

国立公害研究所研究報告第42号

Research Report from the National Institute for Environmental Studies, Japan, No.42, 1983.

# 底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究

Experimental studies on the physical properties of mud and  
the characteristics of mud transportation

水質土壤環境部

Water and Soil Environment Division

大坪 国順

Kuninori OTSUBO

環境庁 国立公害研究所

THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

国立公害研究所研究報告 第42号

底泥の物性及び流送特性に関する実験的研究

正 誤 表

頁	行 他	誤	正																						
14	表 2 - 3	電荷の平均密度の逆数 (A <sup>2</sup> /電荷)	電荷の平均密度の逆数 (Å <sup>2</sup> /電荷)																						
53	表 4 - 5	単位脱落	( 上段 g / kg 下段 me / 100 g																						
82	表 5 - 1	Series V Kasumi Mud 1 w <sub>0</sub> =	Series V Kasumi Mud 1 w <sub>0</sub> =500%																						
133	図 8 - 7	$P_m = 3 \times 10^{-7}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)	$P_m = 3 \times 10^{-5}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)																						
133	図 8 - 7	line ①: $\tau_{c1} = 0.9 \eta_1^{0.59}$ line ②: $\tau_{c2} = 0.4 \eta_1^{0.23}$	line ①: $\tau_{c1} = 3.5 \eta_1^{0.59}$ line ②: $\tau_{c2} = 0.68 \eta_1^{0.23}$ $\tau_c: N/m^2, \eta_1: Pa \cdot s$																						
134	表 8 - 2	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>the first Mud group</th> <th>the second Mud group</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"><math>\tau_{c1}</math></td> <td>a</td> <td>0.9</td> <td>0.4</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>1.3</td> <td>0.67</td> </tr> </tbody> </table>			the first Mud group	the second Mud group	$\tau_{c1}$	a	0.9	0.4	b	1.3	0.67	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="2"></th> <th>the first Mud group</th> <th>the second Mud group</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2"><math>\tau_{c1}</math> (N/m<sup>2</sup>)</td> <td>a</td> <td>3.5</td> <td>0.68</td> </tr> <tr> <td>b</td> <td>9.2</td> <td>1.93</td> </tr> </tbody> </table>			the first Mud group	the second Mud group	$\tau_{c1}$ (N/m <sup>2</sup> )	a	3.5	0.68	b	9.2	1.93
		the first Mud group	the second Mud group																						
$\tau_{c1}$	a	0.9	0.4																						
	b	1.3	0.67																						
		the first Mud group	the second Mud group																						
$\tau_{c1}$ (N/m <sup>2</sup> )	a	3.5	0.68																						
	b	9.2	1.93																						
134	式 (8 - 4)	$\tau_{c1} = 0.8 \tau_{y1}^{0.56}$	$\tau_{c1} = 2.72 \tau_{y1}^{0.56}$ ( $\tau_{c1}: N/m^2$ )																						
134	式 (8 - 5)	$\tau_{c2} = 0.9 \tau_{y1}^{0.94}$	$\tau_{c2} = 0.79 \tau_{y1}^{0.94}$ ( $\tau_{c2}: N/m^2$ )																						
135	図 8 - 9	$\tau_{c1} = 0.75 \tau_{y1}^{0.56}$	$\tau_{c1} = 2.72 \tau_{y1}^{0.56}$																						
	図 8 - 9	$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{c1} = \tau_{y1}^{1/2} \\ (\tau_{y1} \leq 15 \text{ dyne/cm}^2) \\ \tau_{c2} = 0.256 \tau_{y1} \\ (\tau_{y1} \geq 15 \text{ dyne/cm}^2) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{c1} = 0.316 \tau_{y1}^{1/2} \\ (\tau_{y1} \leq 1.5 \text{ N/m}^2) \\ \tau_{c1} = 0.256 \tau_{y1} \\ (\tau_{y1} \geq 1.5 \text{ N/m}^2) \end{array} \right.$																						
144	式 (8 - 29)	$P_m = \text{const.} \div 3.0 \times 10^{-7}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)	$P_m = \text{const.} \div 3.0 \times 10^{-5}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)																						
145	29 行	$3.0 \times 10^{-7}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)	$3.0 \times 10^{-5}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)																						
149	図 9 - 1	縦軸単位 (kg/m <sup>2</sup> ·s)	( $\times 10^2$ kg/m <sup>2</sup> ·s)																						
172	18 行	$P_m = 3.0 \times 10^{-7}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)	$P_m = 3.0 \times 10^{-5}$ (kg/m <sup>2</sup> ·s)																						

## 序

水域水質の問題を考える時、気相との界面における物質収支はかなりよくわかっているのに、固相との界面、すなわち水底での物理現象、化学物質の移動や化学変化は大抵の場合不明か、不正確にしかつかめていない。

後者の化学物質の問題を考えるのは確かにやっかいであるが、物質移動の真相を究明するには、先ず湖沼や estuary の底層でおこる物理現象を明らかにしておく必要がある。本報告は正にそのような要望に答えたもので、底質の組成、分類、性質の考察から始まっているが、特にオリジナリティの発露しているのは、先ず懸濁状態にある水-底泥混合体の静止状態での挙動(干渉沈降機構)を手際よく理論的に解明した部分、次に、上層の流れによる限界掃流力について従来の考えに新知見を加えた点(理論と実験)、さらに第三点として、これが著者の一番力点をおいた部分であるが、底泥の流送機構の考察がある。底泥の流送を考えるにあたり、著者は、従来の「巻き上げ」とか「浮上」という言葉を用いず、「飛び出し」という新しい表現を使った。当然のことながら、飛び出し量という concept は、古典的な限界掃流力値と密接な関係を持っていなければならない。それは報告中で明白に関係づけられている。

この報告で実験対象とした底泥は、霞ヶ浦のものに限らず、酒沼、手賀沼、榛名湖なども含まれている。要するに本報告で、底泥粒子あるいは団塊の、底泥ゾーンからの離脱現象というものが明らかになったわけで、そのこと自体にも意義があるが、これから解明されるであろう、底層-水系での物質移動機構、溶存酸素伝達機構や酸化・還元・溶出現象の研究に寄与するであろう。

昭和 57 年 12 月 7 日

国立公害研究所水質土壌環境部

部長 合 田 健

# 目次

Abstract .....	1
第1章 序論 .....	7
第2章 底泥の成分と構造 .....	11
第2.1節 底泥成分の概観 .....	11
第2.2節 底泥の無機成分 .....	11
2.2.1 一次鉱物 .....	12
2.2.2 二次鉱物 .....	12
第2.3節 交換性塩基 .....	14
第2.4節 底泥の有機成分 .....	15
2.4.1 イオン交換反応 .....	15
2.4.2 有極性分子の吸着 .....	15
2.4.3 底泥中の有機物 .....	15
第2.5節 底泥の構造 .....	16
第2.6節 底泥のレオロジー的分類 .....	17
第2.7節 結 論 .....	19
第3章 底泥の物性に関する実験 .....	21
第3.1節 底泥の物理化学的試験 .....	21
3.1.1 底泥および粘土の種類 .....	21
3.1.2 粒度分布 .....	22
3.1.3 比重と灼熱減量比 .....	25
3.1.4 コンシステンシー指数 .....	26
第3.2節 結 論 .....	27
第4章 底泥の沈降特性 .....	29
第4.1節 概 説 .....	29
第4.2節 実験条件および方法 .....	31
第4.3節 底泥の沈降形態 .....	31
第4.4節 界面および沈積面の時間変化と最終状態 .....	36
4.4.1 界面および沈積面の時間変化 .....	36
4.4.2 界面沈降に及ぼす底泥の影響 .....	37

4.4.3	最終状態の特性	39
4.4.4	自重圧密の影響	43
第4.5節	土粒子の分散および凝集	47
4.5.1	底泥中の水分	48
4.5.2	電気拡散二重層	49
4.5.3	土粒子の分散・凝集	49
4.5.4	粘土の沈降形態の違いの原因	52
4.5.5	粘土の吸着陽イオンの置換による沈降形態の変化	54
4.5.6	水溶液のpHと保護コロイド	55
第4.6節	沈降特性に関する理論的考察	55
4.6.1	沈降曲線	55
4.6.2	Kynchの理論	59
4.6.3	圧密沈降に関する理論	65
4.6.4	沈降現象の支配方程式	66
4.6.5	最終状態の支配方程式と特性	69
第4.7節	結 論	76
第5章	底泥の流動曲線	79
第5.1節	概 説	79
第5.2節	実験条件およびその方法	80
5.2.1	粘度計	80
5.2.2	測定方法	81
5.2.3	底泥試料	81
第5.3節	流動曲線の特徴	83
5.3.1	解析の方法	83
5.3.2	流動曲線の特徴	85
第5.4節	実験結果とその考察	88
5.4.1	底泥の種類の影響	88
5.4.2	含水比の影響	88
5.4.3	吸着陽イオンの影響	89
5.4.4	泥温の影響	93
5.4.5	ずり速度の変化率や最大ずり速度の影響	93
第5.5節	底泥の粘度と降状値	98
5.5.1	底泥の粘度	98
5.5.2	底泥の降状値	99
第5.6節	他の物性量との関連	101
第5.7節	結 論	102

第6章 底泥の流送に関する既往の研究	105
第6.1節 概説	105
第6.2節 粘着性土の流送に関する主な既往の研究	106
第6.3節 結論	109
第7章 底泥の流送形態	113
第7.1節 流送実験の目的	113
第7.2節 流送実験装置	114
第7.3節 実験条件およびその手順	114
第7.4節 底泥の流送形態	116
7.4.1 流送形態による底泥のグループ区分	116
7.4.2 第一底泥グループの流送形態の特徴	117
7.4.3 第二底泥グループの流送形態の特徴	118
7.4.4 デンプンおよび寒天含有の影響	118
7.4.5 底泥の代表的な流送形態	119
7.4.6 巻き上がり粒子の大きさ	119
7.4.7 流送形態と沈降および流動特性との関連	119
第7.5節 結論	123
第8章 底泥の限界掃流力	125
第8.1節 概説	125
第8.2節 限界掃流力の実験	125
第8.3節 実験結果	128
8.3.1 流送限界と破壊限界	128
8.3.2 底泥の種数の影響	128
8.3.3 含水比の影響	130
第8.4節 限界掃流力と物性との関係	131
8.4.1 物理化学的試験項目との関連	131
8.4.2 沈降特性との関連	132
8.4.3 流動特性との関係	132
第8.5節 限界掃流力に関する理論的考察	136
8.5.1 流送抵抗力	136
8.5.2 初期移動機構	136
8.5.3 限界掃流力に及ぼす重力の影響	142
8.5.4 底泥の限界掃流力	144
第8.6節 結論	145

第9章 底泥の飛び出し率	147
第9.1節 概説	147
第9.2節 飛び出し量の実験	147
第9.3節 実験結果の概要	148
第9.4節 連行係数	150
第9.5節 無次元飛び出し率	155
9.5.1 飛び出し率と掃流力に関する無次元量	155
9.5.2 基準時間	156
9.5.3 代表密度・代表粒径	157
9.5.4 飛び出し率の無次元表示	158
第9.6節 飛び出し率に関する理論的考察	162
9.6.1 底泥粒子の運動方程式	162
9.6.2 底泥粒子の移動速度	163
9.6.3 無次元飛び出し率の定式化	164
9.6.4 無次元飛び出し率の推定式と実験結果との比較	168
9.6.5 無次元飛び出し率による流送限界の再評価	172
第9.7節 研究成果と問題点	172
第9.8節 結論	173
第10章 結論	175

# CONTENTS

<b>Abstract</b> .....	1
<b>1. Introduction</b> .....	7
<b>2. Ingredients of mud and deposit structures</b> .....	11
2.1 Outlines of ingredients of mud .....	11
2.2 Inorganic matters in mud .....	11
2.2.1 Primary minerals .....	12
2.2.2 Secondary minerals .....	12
2.3 Exchangeable base adsorbed in mud .....	14
2.4 Organic matters in mud .....	15
2.4.1 Ion exchange reaction .....	15
2.4.2 Adsorption of polar molecule .....	15
2.4.3 Kinds of organic matters in mud .....	15
2.5 Deposit structures of mud .....	16
2.6 Mud classifications by rheological behavior .....	17
2.7 Conclusion .....	19
<b>3. Experiments for physico-chemical properties of mud and soil</b> .....	21
3.1 Experimental results of soil test for muds .....	21
3.1.1 Muds and clays used in soil test .....	21
3.1.2 Grading properties .....	22
3.1.3 Specific gravity and ignition loss .....	25
3.1.4 Consistency index .....	26
3.2 Conclusion .....	27
<b>4. Settling properties of mud and clay</b> .....	29
4.1 Introduction .....	29
4.2 Experimental description .....	31
4.3 Settling modes of mud .....	31
4.4 Settling and depositing curves and final settling states .....	36
4.4.1 Settling or depositing curves .....	36
4.4.2 Effects of mud kinds on collective subsidence .....	37



4.4.3	Properties of final settling states .....	39
4.4.4	Effect of consolidation .....	43
4.5	Dispersion and flocculation of mud particles .....	47
4.5.1	Water in mud .....	48
4.5.2	Electro dispersional double layer .....	49
4.5.3	Dispersion and flocculation of mud particles .....	49
4.5.4	Factors for the difference of settling modes .....	52
4.5.5	Changes of settling mode owing to the exchange of adsorbed cation .....	54
4.5.6	Effect of pH and protectional colloid .....	55
4.6	Theoretical studies on the settling properties of mud .....	55
4.6.1	Settling curve .....	55
4.6.2	Theory of Kynch .....	59
4.6.3	Theorem for the compression subsidence .....	65
4.6.4	Ruling equation for the settling phenomenon .....	66
4.6.5	Ruling equation for the final settling stage and characteristics of this solution .....	69
4.7	Conclusion .....	76
<b>5.</b>	<b>Flow curve of mud and clay .....</b>	<b>79</b>
5.1	Introduction .....	79
5.2	Experimental description .....	80
5.2.1	Measuring apparatus for the flow curve .....	80
5.2.2	Method for measuring the flow curve .....	81
5.2.3	Muds and clays measured the flow curve .....	81
5.3	Characteristics of flow curves .....	83
5.3.1	Analytical description .....	83
5.3.2	Characteristics of flow curves of muds and clays .....	85
5.4	Experimental results and discussion for them .....	88
5.4.1	Effects of mud kinds .....	88
5.4.2	Effects of water content in percent of dry weight .....	88
5.4.3	Effects of exchangeable cation .....	89
5.4.4	Effects of mud temperature .....	93
5.4.5	Effects of changing ratio of strain velocity and the maximum strain velocity .....	93
5.5	Viscosity and yield value of muds and clays .....	98
5.5.1	Viscosity of muds and clays .....	98
5.5.2	Yield value of muds and clays .....	99
5.6	Relationships between the flow curve properties and other physico-chemical properties .....	101
5.7	Conclusion .....	102

<b>6. Former studies on the transportation of cohesive bed materials</b> .....	105
6.1 Introduction .....	105
6.2 Former studies on the transportation of cohesive bed materials.....	106
6.3 Conclusion .....	109
<b>7. Characteristics of mud transportational modes</b> .....	113
7.1 Introduction .....	113
7.2 Apparatus for the hydraulic experiment .....	114
7.3 Experimental description .....	114
7.4 Characteristics of mud transportation .....	116
7.4.1 Classification of mud group owing to the characteristics of mud transportational modes .....	116
7.4.2 Characteristics of mud transportation for the first mud group .....	117
7.4.3 Characteristics of mud transportation for the second mud group.....	118
7.4.4 Effects of starch and agar contained in mud on the mud transportational behaviors .....	118
7.4.5 <i>Typical forms of mud transportation</i> .....	119
7.4.6 Sizes of picking-up mud particles .....	119
7.4.7 Relationships between the transportational forms of mud and the settling, flow curve properties .....	119
7.5 Conclusion .....	123
<b>8. Critical shear stress of mud and clay</b> .....	125
8.1 Introduction .....	125
8.2 Experiment for the critical shear stress of mud and clay .....	125
8.3 <i>Experimental results of critical shear stress of mud and clay</i> .....	128
8.3.1 Limit of mud particle's movement and the limit of bed destruction.....	128
8.3.2 Effects of mud's kinds on the two critical shear stresses .....	128
8.3.3 Effects of water content on the critical shear stress .....	130
8.4 Relationships between two critical shear stresses of mud and the physico-chemical properties .....	131
8.4.1 Relationships between two critical shear stresses and the soil test results	131
8.4.2 Relations with the settling properties .....	132
8.4.3 Relations with the flow properties .....	132
8.5 Theoretical studies on the critical shear stress of mud .....	136
8.5.1 Transportational resistance .....	136
8.5.2 Mechanism of initial mud movement .....	136
8.5.3 Effects of gravity on the critical shear stress .....	142

8.5.4	Definition of the critical shear stress of mud .....	144
8.6	Conclusion .....	145
<b>9.</b>	<b>Pick-up rate of mud and clay .....</b>	<b>147</b>
9.1	Introduction .....	147
9.2	Experiment for pick-up mass of mud and clay .....	147
9.3	Outline of experimental results of pick-up mass of mud and clay .....	148
9.4	Entrainment coefficient of mud .....	150
9.5	Non-dimensional pick-up rate of mud and clay .....	155
9.5.1	Non-dimensional parameters concerning the pick-up rate of mud and clay and flow shear stress .....	155
9.5.2	Standard duration .....	156
9.5.3	Representative density and diameter of mud particle concerning picking-up .....	157
9.5.4	Non-dimensional expression of the pick-up rate of mud and clay according to the dimensional analysis .....	158
9.6	Theoretical studies on the pick-up rate of mud and clay .....	162
9.6.1	Kinematic equation of mud particle for the sliding condition .....	162
9.6.2	Transfer velocity of mud particle .....	163
9.6.3	Formulation for the non-dimensional pick-up rate of mud and clay .....	164
9.6.4	Verification of the formula for the non-dimensional pick-up rate of mud and comparison with the experimental results .....	168
9.6.5	New definition of the limit of mud particle's movement by use of the concept of the non-dimensional pick-up rate .....	172
9.7	Products of this study for the mud transportation and problems left till the next study .....	172
9.8	Conclusion .....	173
<b>10.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>175</b>

# Experimental studies on the physical properties of mud and the characteristics of mud transportation

by  
Kuninori OTSUBO

## ABSTRACT

Deposition and resuspension process of mud particles on the bed of polluted rivers and eutrophic lakes yields two serious problems in hydro-soil sphere, one is the transportation and diffusion of mud particles themselves and the other is the supply of nutrients and pollutant matters to hydrosphere. In this study, the explication of mud particle suspension mechanism was investigated experimentally and theoretically. The main purpose of this study is to estimate the critical shear stress and pick-up rate of mud reasonably.

It is rather difficult to define the mud in a word, but venturing to say, that is "Mud is the aggregation of the very small particles, which have been yielded naturally or artificially, have been transported by rivers and so on, lastly have deposited on the river mouth, pond, lake or bay bed, and have been influenced by the biological actions."

The mechanism of mud particles suspension had not been enough resolved yet though a great deal of research had been conducted into the basis aspects of it. That is because it closely relates to physico-chemical characteristics of mud and the influences of these characteristics on it have not been enough made clear. Research works on erosion and transportation of cohesive sediments are referred to Partheniaies<sup>1)</sup> and Committee Sedimentation of A.S.C.E.<sup>2)</sup>. Most of the works on erosion resistance of cohesive sediments had dealt with erosion resistance only at low water content in percent of dry weight close to the Liquid Limit and had not mentioned about the effect of water content on the erosion resistance. As contrasted to noncohesive sediments in which the weight and size of the particles are the principle sediment factors controlling erosion, the resistance of cohesive sediments to erosion is related to the electrochemical bond between individual particles. Because the individual particles in cohesive sediments are much smaller, the weight of the particles is normally an insignificant factor compared to the electrochemical forces. In non cohesive sediments the threshold of transport was characterized by a value of the Shields' entrainment function  $\tau/sgd$ , ( $s = \sigma - \rho$ ,  $\sigma$  : density of cohesive sediment,  $\rho$  : density of

water,  $\tau$  : shear stress,  $g$  : gravitational acceleration), which has certain defined values. In cohesive sediments this value would be increased by cohesion, but there is no functional relationship which relates cohesion and grain size. For example, montmorillonites are very fine-grained clays, with sedimentation diameters less than  $1 \mu\text{m}$  (usually between  $0.1-0.01 \mu\text{m}$ ), but a rock flour of similar particle size is not cohesive. The electrochemical bond depends on the ionic charge on the particles, the presence of electrolytes, the mineralogy, temperature, pH, ion exchange, and adsorption. These factors are usually not thought of in the realm of Civil Engineering, but rather are left to the soil chemists, mineralogists, and physicists. Still, from an engineering standpoint, it is desirable to find simple and readily measurable properties to characterize the erosion resistance and resuspension process of cohesive sediments. These are usually evaluated by use of conception of the critical shear stress or the pick-up rate respectively. It is necessary to know not only characteristics of the critical shear stress and pick-up rate of cohesive sediments but also physical properties of them. Then both the hydraulic experiment and some kinds of physico-chemical experiments for mud were exercised. Hereafter, all cohesive sediments used in this study are called "mud" conveniently. The critical shear stress and pick-up rate of mud were measured on the former experiment by use of pipe conduit with rectangular cross section. Some elemental physical properties of mud, *i.e.* grain size distribution, specific gravity, ignition loss, consistency index, settling properties and flow properties of mud were investigated experimentally. The visco-meter used in the measurement of flow curve of mud is able to arbitrarily change the relation between the revolutional number of inner cylinder and time, and able to obtain the continuous flow curve in very low strain velocity range. The relationships between the critical shear stress and pick-up rate of mud and the its physico-chemical properties were investigated on the basis of the results obtained from each experiment,

As a result, it was found that mud were divided into two group according to the characteristics of settling form, flow curve and resuspension process of mud. Two important factors concerning erosion resistance of mud were found to be the viscosity and yield value of mud obtained in very low strain velocity range. The critical shear stress of mud of each group was experimentally related to the viscosity but the relations were different between two mud groups. Besides the critical shear stress of mud of the first group was also related to the yield value experimentally. The pick-up rate of mud of the first group could be generalized by use of the viscosity and yield value of mud. And the non-dimensional pick-up rate formula of mud was obtained theoretically from

kinematic equation of mud particle for sliding condition.

This paper consists of ten chapters. The substance and results of chief chapters are summarized as follows.

In the 2nd chapter, the ingredient of mud and deposit structure of mud are summarized to present elemental informations of mud. Mud consists of the same materials as soil. But, soil consists of three phases, solid, liquid, gas, while, usually mud does of two phases, solid, liquid. The properties of main contents of mud, inorganic matter, organic matter and exchangeable base, are explained briefly. Lastly the muds used in this study were located from the rheological point of view.

In the 3rd chapter, the results of soil test of muds are discussed. The number of muds exercised for soil test was forty. They were clays, clays blended organic matter artificially and natural muds. The ignition loss of lake mud was distributed almost 10% to 20% and the specific gravity was 2.1 to 2.5. Muds showing high ignition loss tended to have low specific gravity. The Liquid Limit and the Plastic Index of mud are considered to reflect the shear strength and plasticity respectively. It was found that the Plastic Index was proportional to the Liquid Limit for most of muds. Both the Liquid Limit and the Plastic Index had a positive correlation to the ignition loss and a negative correlation to the specific gravity.

In the 4th chapter, the settling properties of mud were studied experimentally and theoretically. In spite of the same initial water content condition in percent of dry weight, there occurred two different settling forms. One was collective subsidence and the other was free settling. It was concluded that these settling forms were caused by the exchangeable cation adsorbed on mud particle surface.  $\text{Na}^+$ -mud showed free settling, and  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Al}^{3+}$ -mud showed collective subsidence. Muds were classified into two groups according to the type of settling form. The first mud group consisted of natural muds, Kaolinite, Kaolinities containing organic matter and Montmorillonite, which showed collective subsidence. The second mud group consisted of Bentonite, Bentonites containing organic matter, which showed free settling. In this section, the results of collective subsidence were mainly discussed. The settling volume ratio at final stage, which is the ratio of the height of mud layer at final stage to that at initial stage, was not determined by the initial water content in percent of dry weight, but by the viscosity of mud at initial stage. It was found the effect of the consolidation was not neglected, so the mud concentration at final stage increased with increasing depth from mud surface. The equation explaining vertical profile of mud concentration at final stage was devised on

the basis of the ruling equation of settling phenomena, which could be applied to consolidation period. The features of vertical profile of mud obtained theoretically agreed with that of experimental results.

In 5th chapter, flow curve properties of mud were investigated experimentally. Mud has thixotropic characteristics, so it is necessary to obtain continuous flow curve. The viscosity and yield value of mud in very low strain velocity range are necessary in order to relate flow curve properties of mud to its resuspension process. The flow curves were also divided into two types. One was characterized by the existence of yield value and the bending of flow curve, and the other was characterized by the stage with no yield value and the smooth flow curve which showed power law. The first mud group had the former characteristics, and the second mud group had the latter ones. It was found experimentally that the viscosity was independent of mud temperature in the range from 5°C to 30°C. It was very interesting and important experimental results that the viscosity and yield value of mud were determined approximately by the setting volume ratio at final stage.

In the 6th chapter, former studies about erosion resistance and transportation of cohesive soils were introduced. Though there were many interesting studies with respect to individual phenomena of mud transportation, there was only one study being able to generalize the critical shear stress of mud and was no study being able to formulate its pick-up rate. From the 7th chapter the transportational properties of mud are discussed experimentally and theoretically. In the 7th chapter, the purpose and need of hydraulic experiment for mud transportation are described. The pipe conduit with rectangular cross section was used for measuring the critical shear stress and pick-up rate of mud. It was found that the characteristics of mud transportational phenomena was different between the two mud groups.

Mud of the first group showed a clear interface and some cracks in the normal direction of streamline occurring just before bed destruction. Mud of the second group had a obscure interface and showed misty streamwise streak-lines consisting of mud particles, and the cracks never occurred any time in this hydraulic experiment.

In the 8th chapter, the critical shear stress of mud are dealt with experimentally and theoretically. On the basis of experimental results, it was concluded that the definition of two different critical conditions was necessary. One was the limit of mud particle's movement and the other was the limit of bed destruction. Furthermore, it was made clear experimentally that both critical shear stresses could not be determined by water content in percent of dry

weight, but by the viscosity or the yield value of mud in the very low strain velocity range. Both critical shear stresses showed linear relations to the viscosity on the log-log paper for each mud group. Besides, these critical shear stresses of mud of the first group were related to the yield values; the shear stress for the limit of mud particle's movement was proportional to the yield value with about a half power, and that for the limit of bed destruction was approximately proportional to it and there was little difference between these two values. According to the theoretical consideration, it was concluded that the main initial movement mode of mud particle was sliding and the effect of underwater weight of mud on resuspension (erosion) resistance was negligible compared with the yield value. It was concluded that the critical shear stress, given by static force balance condition, was the limit of bed destruction and not the limit of mud particle's movement.

In the 9th chapter, the pick-up rate of mud are investigated experimentally and theoretically. From the results of data analysis for the pick-up rate of mud, it was found that it was necessary to deal mud with some granular material in respect of its resuspension, and was made clear that the viscosity was the important factor to estimate the pick-up rate of mud. So, from the kinematic equation of mud particle for sliding condition and consideration of fluctuation of flow shear stress, the non-dimensional pick-up rate formula for mud could be obtained. The theoretical curve of pick-up rate of mud well agreed with the experimental results for all mud conditions. Therefore it becomes possible to estimate the pick-up rate of mud over a wide range of the water content in percent of dry weight by use of this formula. Furthermore the new definition for the limit of mud particle's movement was proposed from the non-dimensional pick-up rate. According to this definition, the critical shear stress for this limit was proportional to the yield value, though the value of it was smaller than the yield value.

In this study, the critical shear stress and pick-up rate of mud could be formulated experimentally or theoretically by use of the viscosity and the yield value in very low strain velocity range. The critical shear stress and pick-up rate of mud are the essential factors for mud transportation, so the formulas for these two factors would be able to contribute greatly to the future studies on mud transportation phenomena.



### References

- 1) Partheniades, E. (1965) : Erosion of cohesive soils. Proc. A.S.C.E.,91, HY1, 105-139.
- 2) Task Committee(1968) : Erosion of cohesive sediments. Proc. A.S.C.E., 194, HY4, 1017-1049.

# 第1章 序 論

近年、湖などの富栄養化現象に抱わる底泥の役割についての関心が高まっている。底泥は、ある意味では物質の収納庫のようなものであり、水質や水生生物生態系に大きな影響を及ぼしていることが知られている。

底泥を正確に定義することは簡単ではないが、あえて一言で定義すれば「自然的、人工的要因によって発生した微細粒子が、河川流などにより運搬され、河口・沼・湖・湾の底に堆積したもので、成分的には生物の作用を多少とも受けているもの」となろう。したがって、底泥はなにがしかの化学的変化をとげており、この点で岩石の単なる破砕物と区別される。また温度、光線、水分などの条件がととのえば、生物の生育立地や微生物の培地となりうる点も、岩石破砕物との違いである。底泥はその生成要因・特徴・成分からすると、土壌との類似点が多いが<sup>1)</sup>、土壌は地上に存在し、土壌三相と呼ばれるように固相・気相・液相で構成されているのに対して、底泥は、一部メタンガス等の発酵ガスを含むことはあるものの、ほとんどの場合、間げきは水で満たされ固相・液相の二相で構成される点に大きな違いがある。また土壌では、気象条件や人間活動による水分移動が激しいが、底泥ではそれが比較的少ない。中田<sup>2)</sup>によると底泥の一種であるヘドロの物理学・力学的特徴は次のようである。

- (1) 自然含水比が非常に高く、通常 150~250%程度であるが、表面では 400%程度もある。
- (2) N 値はほぼ 0 であり、レッド（測深鉛：lead）による測深では重錘が自沈する。音響探深の場合には、ヘドロの表面で音波が反射されるので、この両者に差が生じる。この差を浮泥層と称す場合もある。
- (3) 粒度組成は、シルト分が多く 50~90%で、粘土が 10~50%、砂分 3~30%となっている。
- (4) 粒子比重は、2.5~2.8 程度、単位体積重量は海底面直下では、1.1~1.2 t/m<sup>3</sup>、下層でも 1.2~1.4 t/m<sup>3</sup>である。
- (5) 有機物量は地域により違いが見られる。
- (6) 層厚は、海底地形、堆積時間により一定しない。

以上の言葉で底泥の物理学・力学的特徴の概略は述べられている。

底泥は、広い意味での水環境の汚染につながる汚濁物質を含んでおり、湖沼等に推積しても、底質圏として静的な状態で存在しているわけではなく、時には底質圏とその上部の水圏との間で、物理的、化学的な作用による物質の移動があり、そのことによって新たな水質汚濁形態が生ずることがある。

霞ヶ浦のように浅く広い湖では、水質に与える底泥の影響はかなり大きなものと考えられる<sup>3),4)</sup>。

特に夏季にかなりの量の栄養塩が底泥から供給されていることが明らかにされている<sup>5),6),7)</sup>。しかしながら、実際にどの程度の栄養塩類が底泥から回帰しているかを測定することは難しく、実際に使用できるデータはなかなか得難い。湖内の栄養塩の循環のシミュレーションにおいても、底泥と湖水の栄養塩移行経路は未知項として処理されるのが現状である<sup>8)</sup>。一般に、底泥中の物質が水域に移動する形態には、二通りが考えられる。一つは、溶出型と呼び、底泥粒子そのものの移動はなく、底泥の間げき中に存在する溶存態物質が化学的・生物的作用と上部の水流特性によって、主として拡散現象により底泥圏から水圏へ放出されるものである。他の一つは、巻き上げ型もしくは飛び出し型と呼び、主として上部の水中の水理現象が起動力となり、また時には底生魚介の運動によって底泥そのものが巻き上げられ、それに伴って底泥中の物質が水圏に放出されるものである。浅い湖では風などの影響で泥がかく乱される可能性が強く、かく乱による栄養塩類の回帰はかなり多いものと考えられる。湖沼における風による底泥の巻き上げは、霞ヶ浦、諏訪湖、手賀沼、印旛沼、エリー湖<sup>9)</sup>などで観察されている、また、エスチャリーにおける潮流などの流水による底泥の巻き上げの例も少なくない<sup>10),11),12),13)</sup>。

底泥がかく乱されることによる栄養塩類の回帰量を評価するためには、底泥の巻き上げ量の把握が不可欠であると考えられる。底泥がかく乱され巻き上げられる要因としては、水流のほかに底引網などの漁業活動、ハゼ等の主に底生魚類の活動も挙げられるが、これらの要因は今回の研究対象には含まない。本研究は、流水による底泥の巻き上げに研究対象を限定して、その巻き上げ機構の解明を目的としたものである。本研究の最終目標は、底泥限界掃流力と飛び出し量（巻き上げ量）の定式化にあるが、底泥はその生成過程の性質上、複雑な物理化学的性質を擁し、それらが底泥の巻き上げ現象に及ぼす影響が大であるために、底泥の物性を明らかにする必要がある。そのため、底泥の限界掃流力や飛び出し量を求める流送実験のほかに、底泥の物性を求めるための各種の物理的試験や、沈降実験等を行い、底泥の限界掃流力や飛び出し量等を検討した。その結果、底泥は、沈降特性、流動特性、流送形態において二つのグループに大別され、その主な原因が、土粒子に吸着している交換性陽イオンの種類と、底泥の pH にあることが明らかになった。さらに、底泥の限界掃流力や飛び出し量の定式化には、ひずみ速度が 0 付近での底泥の流動特性量（降伏値、粘度）が深く関与しており、これらの特性量によって定式化が可能となった。

本論文は、次のような構成をとる。第 2 章において、底泥の概念を明確にするために、底泥の成分、構造、物性について概説する。第 3 章において、底泥の物理的試験の結果を示す。第 4 章では、沈降特性に関する実験的、理論的考察を行う。第 5 章では、流動特性（せん断応力とずり速度の関係）の実験結果を中心に述べる。第 6 章では底泥の流送に関する既往の研究を紹介する。第 7 章から第 9 章にわたり、底泥の流送に関する研究について述べる。第 7 章では、流送実験の目的、方法の他に、流送形態の特徴を各グループごとに説明する。第 8 章では、底泥の限界掃流力特性について述べ、底泥の限界掃流力を定式化する。第 9 章では、底泥の飛び出し量の特性について述べ、底泥の河床からの離脱に関する運動方程式とせん断応力の分布特性から、底泥の無次元飛び出し率の推定式を誘導し、実験結果と比較してその有用性を確認した。第 10 章で結論と

して、本研究で得られた結果を要約し、今後の問題点等についてもふれた。

## 参 考 文 献

- 1) 川口桂三郎・熊田恭一・青峯重範・古坂澄石・岡島秀夫・佐々木清一・高井康雄・山根一郎・船引真吾 (1974) : 改訂新版 土壌学, 朝倉書店.
- 2) 中田邦夫 (1975) : ヘドロ, 土と基礎, 18 (9), 42-44.
- 3) 津野洋・相崎守弘・須藤隆一・合田健 (1977) : 霞ヶ浦高浜入の夏期における水質・生物変動-II, 国立公害研究所特別研究成果報告, 第1号, 80-94.
- 4) 浜田篤信・津田勉 (1976) : 霞ヶ浦の富栄養化に関する研究III, 窒素収支について, 茨城県内水産試験調査研究報告, 第13号, 29-43.
- 5) 相崎守弘 (1981) : 霞ヶ浦の物質循環における役割, 国立公害研究所調査報告, 第16号, 95-104.
- 6) 相崎守弘・大槻晃・海老瀬潜一・安部喜也・岩熊敏夫・福島武彦 (1981) : 霞ヶ浦高浜入における栄養塩収支, 国立公害研究所研究報告, 第22号, 281-308.
- 7) 岩熊敏夫・今村典子・花里孝幸・安野正之・大槻晃・相崎守弘 (1982) : 湖内実験隔離水界を用いた水質回復実験, 国立公害研究所調査報告, 第21号, 15-35.
- 8) 福島武彦 (1982) : 霞ヶ浦における栄養塩の循環, 国立公害研究所調査報告, 第22号, 3-20.
- 9) Sheng, Y. P. and W. Lick (1979) : The transport and resuspension of sediment in a shallow lake. *J. Geophys. Res.*, 84(C4) 1809-1826.
- 10) 満田雅男 (1967) : 有明海浮泥の渦面変化への影響について, 第14回海岸工学講演会論文集, 286-289.
- 11) 鷺見栄一 (1974) : エスチャリにおける懸濁物質の浮遊機構 (I), 第21回海岸工学講演会論文集, 181-186.
- 12) 村岡浩爾 (1974) : 流れによる底泥浮上と水質との関連, 第18回水理講演会論文集, 181-186.
- 13) 白石英彦・大西亮一 (1976) : 潮流による底泥の浮き上りおよび浮遊土砂の拡散, 第23回海岸工学講演会論文集, 189-194.

## 第2章 底泥の成分と構造

### 第2.1節 底泥成分の概観

底泥成分の構成は複雑であるが、概要をとりまとめると、土壌成分とほぼ同様で、表2-1のようになる。土壌成分と異なるのは、メタンガスのような発酵ガスが存在することもあるが、ほとんどの場合に気相が無視でき、固相とその間げきを満たす液相からなっていることである。底泥の固相の無機成分の主体は粘土鉱物であり、これは造岩鉱物が物理的、化学的風化（加水分解・酸化作用・水和作用）および生物的作用を受けた結果、新しく生じた鉱物で、一般に造岩鉱物より微少である。どちらの鉱物も大部分はケイ酸塩である。交換性塩基は、おもに粘土や有機物にイオンとして吸着されているもので、含有率は少ないが、底泥自身の物理的・化学的性質に及ぼす影響が大きい。有機物には低分子の水溶化合物から、分子量が10,000を超えると考えられる高分子のものまであり、底泥の粘着性の主要因の一つである。

表 2-1 底泥成分の概要  
Table 2-1 Outline of ingredients of mud

I 固相	i 無機物	a 一次（造岩鉱物）、岩石破砕物 b 二次（粘土鉱物） c 交換性（吸収態、置換性）塩基 d 水溶性塩基（硫酸塩、塩化物、炭酸塩など） e 遊離酸化物 f リン酸塩、その他
	ii 有機物	水溶性の低級化合物より高分子化合物にいたる
	iii 生物	微生物、下等動物、水生小動物
II 液相		

### 第2.2節 底泥の無機成分

底泥の無機成分の大部分は、一次鉱物（造岩鉱物）と二次鉱物（粘土鉱物）より成る。一般に前者は大形で無水物、後者は微細で含水性である。両者の粒径は、0.001~0.01 mmあたりを中心に

重なりあっているとされる。

### 2.2.1 一次鉱物

底泥中の一次鉱物についてはあまり知られていないが、土壌中の組成から類推すると、底泥中の一次鉱物の組成は、風化に対して抵抗力の強い石英の比率が多いと考えられる。底泥中の一次鉱物は大別して、石英類、長石類、輝石および角閃石類、雲母類、その他である。

### 2.2.2 二次鉱物

粘土は大部分が二次鉱物から構成されているが、粘土粒子を粗粘土(2~0.2 $\mu\text{m}$ )と細粘土(<0.2 $\mu\text{m}$ )に分類すると、前者に石英、長石などの一次鉱物がかかなり含まれている。後者はほとん

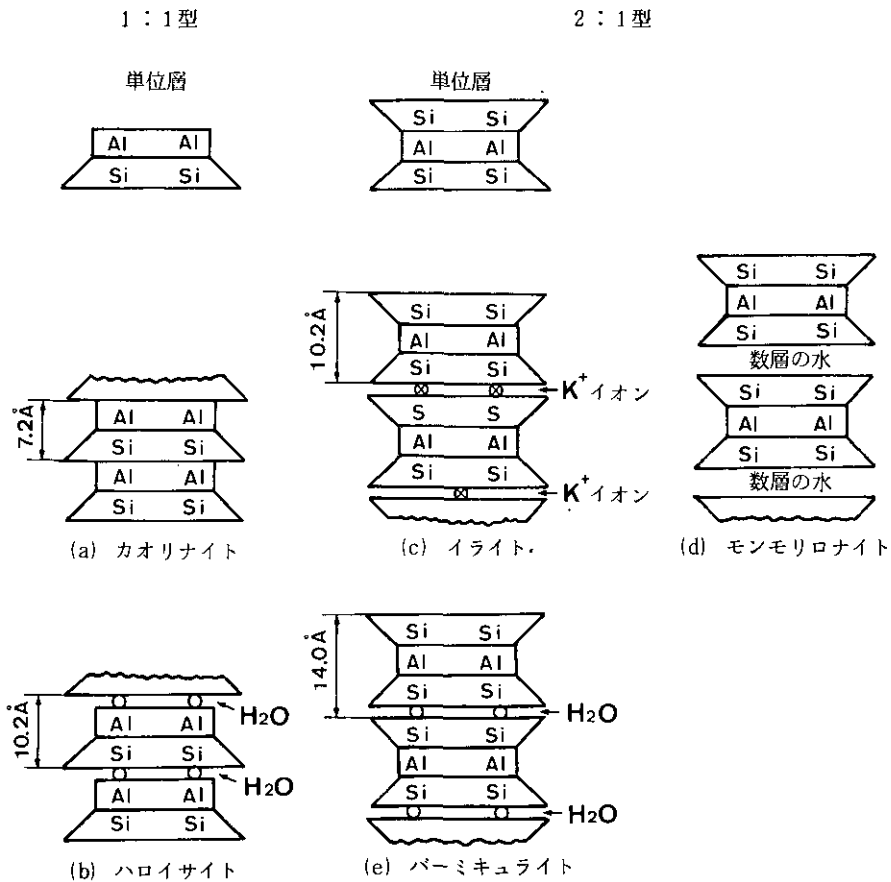


図 2-1 代表的な粘土鉱物の模式的な構造<sup>2)</sup>  
 Fig. 2-1 Schematic structures of representative clay minerals<sup>2)</sup>

どすべて二次鉱物である。粘土鉱物の定義は、広狭二様に用いられているが、粘土鉱物の大部分は二次鉱物とみなしてよい。粘土鉱物には結晶質と非結晶質があり、前者はAl, Fe, Mg, アルカリ金属からなる層構造珪酸塩類である。層構造は、図2-1<sup>2)</sup>に示すようにSi四面体(Silica-sheet)およびAl八面体(Almina-sheet)といわれる2種の基本単位からなり、その重なり方によって、粘土鉱物の型は、1:1型(カオリナイト, ハロイサイトなど), 2:1型(イライト, モンモリロナイト, パーミキュライトなど), 2:1:1型(緑泥石), 混層型鉱物, その他に分類される。各粘土鉱物の単位層の厚さは、カオリナイトは7.2 Å, ハロイサイトは10.2 Å, イライトは10.2 Å, パーミキュライトは乾燥状態で10.2 Å, 風乾状態で14 Å, モンモリロナイトは乾燥, 風乾状態では10.2 Å, 14 Åであるが、湿潤状態ではさらに膨張する。2:1型鉱物におけるこのような相違は、次のように説明される。2:1型鉱物ではSi四面体のSi<sup>4+</sup>がAl<sup>3+</sup>と、またAl八面体のAl<sup>3+</sup>がFe<sup>3+</sup>, Mg<sup>2+</sup>などといくらか同形置換を行っている。この置換は結晶形に基本的な変化をもたらさないが、鉱物の性質には重要な変化を起こす。原子価の異なるイオンが同形置換すると、結晶格子内に通常陰荷電が生じ、これを中和するために陽イオンを吸着する。このような静電的な陽イオン吸着は、1:1型鉱物には見られない。同像置換の多少や、吸着する陽イオンの種類によって、2:1型鉱物における水分子に対する反応が異なったものとなる。

底泥に含有される粘土鉱物の含有比率の一例として、松尾・嘉門<sup>3)</sup>の研究がある。大阪府堺港航路上で採取したヘドロの、結晶性粘土物の含有比率をX線回折分析で判定して、表2-2の結果を得ている。表2-2によれば、カオリナイト系がイライト系の約2~2.5倍量となっている。一般に、海底における安定鉱物がイライト系およびクロライト系であり、陸水域の粘土鉱物のそれがカオリナイト系であることから、試料としたヘドロの生成には河川からの流入土砂が大きく関与していると結論づけている。

表 2-2 X線回折による粘土鉱物の相対成分比<sup>3)</sup>Table 2-2 Relative ingredient ratio of clay minerals obtained by use of X-ray Diffraction method<sup>3)</sup>

Sample	Kaolin	Illite	Ver.+Mont.	Remarks	
S 1	62.0	20.0	18.0	Height Area	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> treatment
	75.0	7.5	17.5		
	56.5	20.3	23.2	Height Area	Ca-saturated
	57.1	11.6	31.3		
S 2	50.9	25.5	23.6	Height Area	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> treatment
	54.0	14.4	31.6		
	49.0	18.4	32.6	Height Area	Ca-saturated
	44.8	9.5	45.7		

Ver. : Vermiculite  
Mont. : Montmorillonite

### 第 2.3 節 交換性塩基

交換性塩基はおもに粘土や有機物にイオンとして吸着されている。このイオンは、粘土粒子や有機物表面に存在する負の電荷を中和させるために、これらの表面に吸着された、間引き水中の塩の、正に荷電されたイオンのことである。交換性の名のゆえんは、この陽イオンが等価の他の陽イオンで、あるいは同じイオンの原子価の1/2のものでは2個で、簡単に置換されるためである。

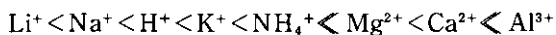
粘土粒子の電荷発生の第一の要因は、前述した結晶内のイオンの同形置換である。この型の荷電によって吸着されている陽イオンは、主として結晶格子層面上、あるいは層間に存在している。第二の要因は、粒子端部における不備な満たされない原子価の電荷であり、これは破壊原子価と呼ばれる。表 2-3 に主な粘土鉱物の電荷の量についての測定例<sup>4)</sup>を示す。

表 2-3 粘土鉱物の電荷<sup>4)</sup>  
Table 2-3 Elective charge of clay minerals<sup>4)</sup>

粘 土 鉱 物	電荷の範囲 (me/100g)	電荷の平均密度の 逆数 (A <sup>+</sup> /電荷)	電 荷 の 発 生 源
カオリナイト	5~15	25	端部における破壊された結合およびOHのある種のイオン化
雲母族鉱物 および緑泥岩	20~40	50	格子におけるイオン置換および端部における破壊された結合
モンモリロナイト	80~100	100	イオンの置換および破壊された結合からのわずかな寄与
パーミュキュライト	100~150	75	格子内のイオン置換および破壊された結合からのわずかな寄与
アロフェン	40~70	120	破壊された結合および八面体構造中のAl

有機物の負電荷は、カルボシル基やフェノール水酸基の水素イオン化によって生じるとされている。

土中での優勢な交換性陽イオンは、地質学的環境とそれに続く溶脱によって決定される。海水中で堆積した粘土においては、Mg<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>が圧倒的に多くなり、石灰質土壌ではCa<sup>2+</sup>が主となる。陽イオンはその種類によって置換能力が異なるが、その能力を比較すると、大体次のようになることが知られている。



陽イオンの交換反応においては、置換能力の小さいものが、全て置換力の大きなものに置換さ



れてしまうのではなく、交換しようとする溶液のイオン濃度等の条件によって決まる交換平衡濃度まで反応が進む。粘土粒子に吸着された陽イオンの種類によって、粘土の分散および凝集現象、可塑性、粘性などの物性が著しく変化する。これについては後述する。

## 第2.4節 底泥の有機成分

底泥はかなりの量の有機物を含んでいる。有機物は、粘土粒子間の結合の主要因の一つである。有機物は、主に粘土鉱物との間で粘土-有機物複合体（以下、有機複合体と略称）を形成して底泥中に存在する。粘土と有機物の相互反応の様相は、粘土鉱物の種類、化学的組成、層面の荷電状態、層面に存在する水の量と無機陽イオンの原子価、ならびに有機物の種類、大きさ、極性基の存在などの多くの因子に支配される。粘土と有機物の相互反応には、イオン交換反応と極性吸着が考えられる。また粘土鉱物が有機物の高分子構造の中に機械的に取り込まれる機能もありうるが、自然界では、主に前の二つ反応による。一般に有機陽イオンはイオン交換反応により、有機性有機物は極性吸着により有機複合体をつくっている。

### 2.4.1 イオン交換反応

正電荷をもつ有機物の粘土への吸着は、粘土の交換性において、静電気力と Van der Waals 力の両方によって起こる。この種の有機物の吸着は、粘土の陽イオン交換容量の減少、粘土層間隔の伸長、吸着水量の変化、粘土の粘性の変化が起こることが知られている<sup>5)</sup>。

### 2.4.2 有機性分子の吸着

粘土鉱物の構造は有機性であり、また多くの有機物は双極子となっている。よって粘土鉱物が、有機性有機物を含む溶液、あるいは懸濁液と接触すると、粘土の正および負電荷の中心は、液中の有機性分子のそれぞれ負および正電荷の中心をひきつけ極性吸着が起こる。極性吸着では、すでに粘土表面に吸着されていたイオンを当量的に交換浸出しない。極性吸着による有機複合体の生成過程は、粘土の種類によって異なる。すなわち、粘土の各層間に露出している表面の帯電の状態によって異なる。

### 2.4.3 底泥中の有機物

松尾、嘉門<sup>6)</sup>は、前述のヘドロに対して赤外線吸収スペクトル分析の結果から、ヘドロ中の有機物を構成する結合として、 $-C-CH_3$  や  $-OH$  基の存在を推定した。また X 線回折分析結果から、有機複合体の吸着は無極性溶媒で除去される程度の弱いものであると推定した。

向井（国立公害研究所、未発表）は、1977年6月に、霞ヶ浦西浦高浜入4地点、大山沖1地点で、エックマン・バージ採泥器を用いて採取した底泥について、含有有機物の同定を行った。その結果、CHN コーダによって求められた高浜入4地点の平均有機物量は、Total Carbon から推

定すると、約(86 g/kg乾泥)となる。減量比で表せば約8.6%となる。そして Total Carbon の内訳としては、非腐植物質(メタノール・ベンゼンなどで抽出される脂質+酸抽出されるヘミセルロース、セルロース、炭水化物)が約22%、腐植酸+フルボ酸(アルカリ抽出)が約38%、 $H_2O_2$ 抽出されるヒューミン(酸でもアルカリでも抽出されない腐植物質)が約33%、 $H_2O_2$ でも抽出されないヒューミンが約8%なる結果を、Total Nitrogen の内訳では、非腐植物質が41.6%、腐植酸+フルボ酸が34.8%、 $H_2O_2$ 抽出ヒューミンが10.6%、 $H_2O_2$ でも抽出されないヒューミンが13.0%という結果を得ている。これらの有機物は、前述したイオン交換反応や極性吸着によって粘土粒子に吸着して底泥を形成している。

## 第2.5節 底泥の構造

底泥を形成している土粒子は、力学的な作用を受けたり、存在している周辺的环境から受ける物理化学的な作用の下で、ある種の安定な配列をとっている。土粒子の並び方を土の構造と呼んでいるが、底泥の場合、堆積構造と呼び換えてもよい。底泥においては、底泥構成粒子自体が陰陽イオンに帯電しているため、界面イオンの種類と濃度に基づく物理化学的な力の影響が大きく、堆積構造はこれらの作用に依存した配列状態となる。

以下に述べる内容は、土壌や自然土に関する土の構造に関するものであるが、底泥の場合も本質的な違いはない。土の構造は、第一段階の構造と、第二段階の構造に別けて考えられる。第一段階は、単一粘土粒子が集まって形成されている構造単位の配列、と定義される。第二段階の構造は、構造単位内の粘土粒子の幾可的配列と定義される。第一段階の構造では構造単位の大きさによって、ベッド(ped  $>50\mu m$ )、クラスター(cluster  $2\sim50\mu m$ )、ドメイン(domain  $0.1\sim2\mu m$ )に分類される。第二段階の構造は、ドメイン内の粒子の配列と換言できる。一般にドメイン内の粒子は平行配列である。ドメインが結合してクラスターを形成し、それが結合してベッドを形成すると考えられている。ベッドの大きさは肉眼で認識できる粒径範囲である。

構造単位の土粒子には、交換性陽イオンの水和層(拡散イオン層とか電気二重層とも呼ばれる)を介して、反発力と引力が互いに作用し合う。引力には、Van der Waals力とCoulomb力があり、前者は原子間距離の7乗に反比例し、また大きな粒子に対してはさらに高いべき数に反比例する力であり、後者は粒子間距離の2乗に反比例している。反発力は同型の水和層が重なると現れ、水和層の厚さや電解質濃度に大きな影響を受ける。その他粒子間を結合するものとして、前述した有機物や、炭酸塩とか酸化物のような、粒子の間を埋める無機化合物がある。これらの力の相互作用別用によって第一段階の構造が決まる。

第一段階の構造の基本モデルはつぎのようである<sup>4)6)</sup>。(図2-2参照)

### (1) ランダム構造 (random structure)

粒子間の反発力が引力に比して大きく、ランダム配置となり密な接触を持たない。淡水中で自然堆積した場合に多い。

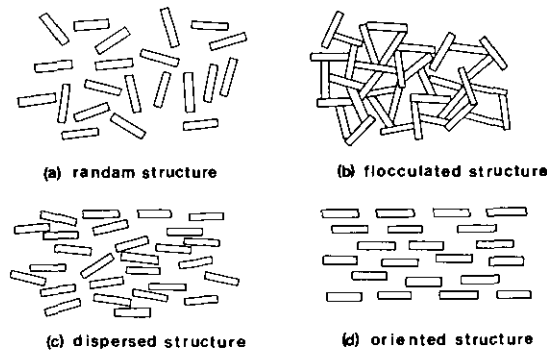


図 2-2 土の構造基本モデル<sup>4)</sup>  
 Fig. 2-2 Fundamental models for the deposit structure of mud and soil<sup>4)</sup>

#### (2) 綿毛化構造 (flocculated structure)

粒子間の反発力が引力に比べて小さいと生じ、構造単位の特別な配向のない密の凝集をいう。海中のような高濃度での堆積に多い。

#### (3) 分散構造 (dispersed structure)

構造単位がある程度配向した状態で、淡水中の不活性粘土が自然堆積したとき、あるいは小さな圧密荷重を受けたときがこれにあたる。

#### (4) 配向構造 (oriented structure)

構造単位は配向配列した状態で、大きな圧密荷重を受けたものが多い。

構造単位内には第二段階の構造が存在している。第一段階の構造の基本モデルと、第二段階の構造の配列の組み合わせのうち、典型的なものとしては図 2-3<sup>4)</sup>に示したものがある。一般的に、土の応答挙動の重要部分は、第一段階の構造特性のみに関係し、第二段階の構造は関係しないと考えられている。ある土の構造単位がどのようなものであるかは、粘土鉱物の種類や構成比、交換性陽イオンの種類、有機物などの膠結物質の種類や量が、深く関係している。一般の自然土では、単一粘土粒子が単独で存在することはほとんどなく、構造単位はベッドやクラスターと考えられ、それらが膠結物質や粒子間力によって独特の配列と安定がもたされている。しかし例外として、高膨潤粘土である  $\text{Na}^+$ -モンモリロナイト (交換性陽イオンが  $\text{Na}^+$ ) では構造単位は単位の粘土粒子と考えられ、第一段階、第二段階という構造の区別がない。

### 第 2.6 節 底泥のレオロジー的分類

ここで、この研究の対象とした底泥や粘土がどのようなものかを、レオロジーの立場から位置づけておくことにする。図 2-4 は、土のレオロジー的挙動を主成分となる構造単位の粒子径と含

(a) 全構造等方体



- (1) ランダムベッド配列
- (2) ベッド内のランダム粒子配列

(b) 構造単位等方体



- (1) ランダムベッド配列
- (2) ベッド内の配向粒子配列

(c) 構造単位異方体



- (1) 配向ベッド配列
- (2) ベッド内のランダム粒子配列

(d) 全構造異方体



- (1) 配向ベッド配列
- (2) ベッド向の配向粒子配列

図 2-3 土粒子の第1次および第2次段階の配列の代表的組み合わせ<sup>4)</sup>

Fig. 2-3 Representative combinations between the configuration of primary stage and that of secondary stage<sup>4)</sup>

水比で、模式的に領域区分したものである。縦軸に粒子径を、横軸に含水比をとり、気相がない場合すなわち飽和状態について検討した。2本の太い実線①、②で囲まれた範囲が飽和状態である。実線①は、構造単位が破壊されることなく実現可能な下限の含水比を示し、実線②は静止状態で存在しうる上限の含水比を示す。また粒子が74  $\mu\text{m}$  以上になると表面力の影響がほとんど無視でき、逆に2~3  $\mu\text{m}$  以下では重力の影響が無視される。Iの領域は粒状体と考えられるが、この領域の含水比に幅が存在するのは、粒子形状、充項形式の影響である。通常、液性限界(L.L.)に近い含水比の状態II、IIIは、大きな圧密荷重や遠心分離作用によって実現される。L.L.付近では、粒子相互は不連続となっているが、水膜を隔てて安定な系として存在している。含水比が増加するにつれてペースト状から、懸濁体へと移行してゆく。それにつれて、ビンガム流体的性質から非ニュートン流体的性質をへて、粘性流体的性質へと変化する。現地で採集した底泥は、ほとんどIVの領域に入る。粘土はV、VI、VII、に入る。非膨潤性粘土はVの領域のみに位置し、膨潤粘土はVI、VIIの領域でも存在しうる。IV、Vの領域の底泥には降状値が存在し、塑性的、粘弾性的およびビンガム流体的挙動を示す。今回の流送特性の研究の対象とした底泥や粘土は、ほとんどIV、Vの領域に区分けされるが、一部VI、VIIの領域に区分けされるものもある。

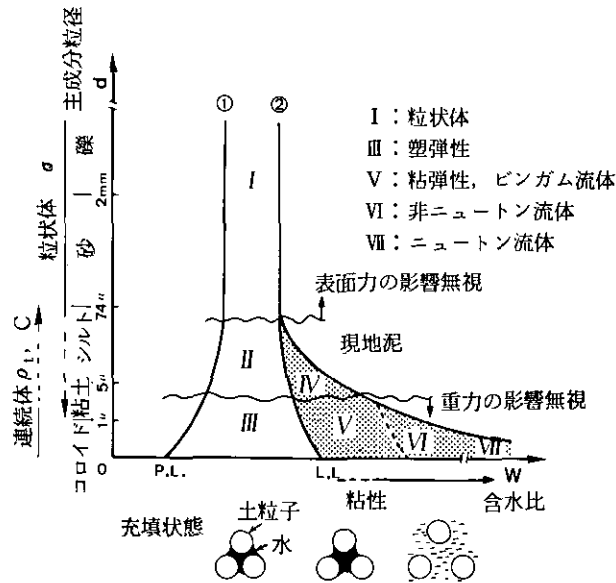


図 2-4 底泥のレオロジー的挙動の分類  
 Fig. 2-4 Classification of rheological behavior of mud and clay

第2.7節 結論

本章では、底泥に関する基礎知識として、底泥成分と構造について概説した。底泥は土壌とほとんど同じ成分構造であるが、土壌と違い、気相がなく固相とその間げきを満たす液相の二相から成り立っている。固相の成分は主として無機成分で、その他有機成分、生物からなる。底泥の無機成分は、一次鉱物（造成鉱物）とそれが物理的・化学的風化および生物的作用をうけた二次鉱物（粘土鉱物）からなり、一般に前者は大形で無水物、後者は微細で含水性がある。両者の粒径は、0.001~0.01 mmあたりを中心に重なり合う。粘土鉱物は結晶質と非結晶質があり、前者はシリカ四面体とアルミナ八面体を単位とした層構造を成しており、その重なり方により様々な粘土鉱物が生成する。交換性塩基は、粘土や有機物の表面の負電荷を中和するために、イオンとして吸着されている。この陽イオンは比較的簡単に他の陽イオンと置換する。粘土表面の負電荷は同形置換や、破壊原子価により発生し、有機物ではカルボキシル基やフェノール水酸基のイオン化により生じる。陽イオン交換容量は粘土鉱物によって著しく異なる。

有機成分は、粘土粒子間の結合の大きな要因である。有機物は、粘土鉱物との間で粘土-有機物複合体を形成する。その形成機構には、イオン交換反応と極性吸着が考えられる。底泥中の有機物の8割近くは腐植やヒューミンで占められる。

底泥の堆積構造は、第一段階の構造と第二段階の構造に別けられる。第一段階の構造とは、単一粘土粒子が集まって形成されている構造単位の配列ををいい、第二段階の構造とは、構造単位

内の粘土粒子の幾可学的配列をいう。一般的に土の応答挙動の重要部分は、第一段階の構造のみに関係する。第一段階の構造の基本モデルには、ランダム構造、綿毛化構造、分散構造、配向構造がある。

底泥のレオロジー的挙動を主成分となる構造単位の大きさと含水量によって分類した(図2-4参照)。今回の流送実験の対象となった含水比条件では、現地泥は、IVの領域に、粘土はほとんどが、Vの領域に分類された。これらの領域の特徴は、降状値が存在し、塑性的、粘弾性的およびビンガム流体的挙動を示すことである。

#### 参 考 文 献

- 1) 川口桂三郎・熊田恭一・青峯重範・古坂澄右・岡島秀夫・佐々木清一・高井康雄・山根一郎・船引真吾(1974):改訂新版 土壌学, 朝倉書店。
- 2) 土木学会編(1974):土木工学ハンドブック, 技報堂, 95-135.
- 3) 松尾新一郎・嘉門雅史(1973):物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について, 土木学会論文告集, 第209号, 103-113.
- 4) Yong, R. N. and B. P. Wokentin (山内豊聡, 竹中肇, 東山勇, 前田隆' 監訳)(1978):新編土質工学の基礎, 鹿島出版会,
- 5) 日本粘土学会編(1967):粘土ハンドブック, 技報堂, 95-137.
- 6) 土壌物理研究会編(1979):土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版.

## 第3章 底泥の物性に関する実験

### 第3.1節 底泥の物理的試験

土の物理化学的性質の多くは、土粒子の表面反応であり、表面の性質が深く関与している。土の物理化学的性質を示す重要な要素として、土粒子の比重、粒度分布、土粒子の形状、粒子表面積、有機物量、コンシステンシー指数、団粒度、単位体積重量、間隙比、含水比、粘度、土の構造、分散度、水中沈定容積、土の膨張・収縮度などが挙げられる。上記の諸要素は、全て何らかの形で表面の性質の影響を受け、それによってある安定した値に収まっていると考えられる。有機物を排除して完全分散状態にした場合の、粒子の比重、粒度分布、形状のみが、表面に関与することなく決まる量と考えられる。また上記の要素のうち含水比によらぬものは、比重、粒度分布、土粒子の形状、粒子の表面積、有機物量、コンシステンシー指数の6要素であり、他の8要素は多少とも含水比の影響を受ける。底泥のように飽和状態では、含水比、間げき比、単位体積重量、比重の間には次の関係が認められる。

$$e = \frac{w}{100} G_s \quad (3-1)$$

$$\rho_t = \frac{\rho G_s (100 + w)}{100 + G_s w} \quad (3-2)$$

ここで、 $e$ ：間げき比、 $w$ ：含水比(%)、 $G_s$ ：土粒子の真比重、 $\rho_t$ ：土の単位体積重量(密度)、 $\rho$ ：水の単位体積重量(密度)である。

土質工学の分野でよく行われる試験は、土粒子の真比重試験、含水量試験、粒度試験、コンシステンシー試験、単位体積重量試験などの物理的試験である。今回の研究では、含水量に関与しない土の状態量として、比重、粒度、コンシステンシーの物理的試験と、有機物量を表わす1つの指標として、灼熱減量比 (v.s.s) を測定した<sup>12)</sup>。試験を行なった底泥と粘度の種類と、平均粒径  $d_m$ 、中央粒径  $d_{50}$ 、粒度分布の標準偏差  $\sigma_d$ 、比重  $G_s$ 、灼熱減量比、塑性限界  $w_p$ 、液性限界  $w_L$ 、塑性指数  $I_p$  を表3-1に示す。

#### 3.1.1 底泥と粘土の種類

実験を行なった底泥や粘度の種類としては、純粹粘土、それに有機物を混入させたもの、現地底泥、さらにはそれに化学的処理を行なったものなどがある。人為的に有機物を混入した目的は、土の物性に及ぼす有機物の種類や量の影響、さらに、粘土の種類による影響を検討するためであ

る。カオリナイトとベントナイトに混入した有機物は、可溶性デンプンと寒天である。両有機物は、分子量の大きい鎖状分子構造で、非電解質ではあるが、OH基を多数含むため極性をもつ。そのため有機複合体を生成する機構として、イオン交換反応はほとんどなく、極性吸着や、粘土粒子が有機物の高分子体構造の中に物理的に取り込まれる機構によると考えられるが、両者のどちらが主要なものであるかは定説がない。両有機物を選んだ理由として、両有機物が活性汚泥や底泥中に存在すること、粘土鉱物の陽イオン交換容量や荷電状態によらず含有率を決められること、手順が単純なことが挙げられる。表3-1中の(%)は、有機物/(粘土+有機物)で定義した有機物の重量含有率である。有機物を含有させる手順は、所定量の水に有機物を混入し加熱溶解させた後、粘土を加えて練り上げ、自然冷却させる。寒天含有粘土は冷却すると一つの大きな塊となるので、乳鉢でつぶしたのち、0.1mmのふるいで裏ごしした。

現地底泥は、No.26の霞ヶ浦沈降物を除いて、すべて現地においてエックマン・バージ採泥器を用いて採取したものである。採取泥厚は、泥表面から10~15cm程度までである。湖沼泥はほぼ湖心で採取したが、河口泥は橋梁上の採取可能地点で採取したため、地点が一定してない。霞ヶ浦底泥は霞ヶ浦西浦高浜入での採取泥である。Kasumi Mud 1は無処理泥、Mud 2は濃度30%の $H_2O_2$ で加熱処理した泥、Mud 3はMud 2にデンプンを10%含有させたもの、Mud 4はMud 2に寒天を10%含有させたもの、Mud 5はMud 1からベンゼン・メタノール処理によって脂質を抜いた泥、Mud 6は1規定NaOHによる加熱処理により腐植を一部除去した後、塩酸を加えてpH約7に調整した泥である。霞ヶ浦沈降物は、高浜入で採取した沈降物質<sup>3)</sup>である。No.34~40の河口泥の採集地点は、No.34は名古屋市の中川運河東海橋、No.35は大阪市堂島川船津橋、No.36は大阪市土佐堀川端健橋、No.37は名古屋市庄内川正徳橋、No.38は名古屋市庄内川批把島橋、No.39は大阪市寝屋川放出橋、No.40は田子の浦潤井川河口である。

### 3.1.2 粒度分布

粒度分布の測定には光透過法測定装置を用いた。光透過法は液相沈降法の一つである。懸濁液に側面から光をあてて透過する光の量から粒子濃度を求める<sup>4)</sup>。本方法においては遠心沈降法を併用することにより、測定時間を大幅に短縮できる。表3-1の $d_m$ 、 $d_{50}$ 、 $\sigma_g$ の各値は重量分布から求めた値であり、( )内の数値は、アンドレアゼン・ピペットによる測定結果である。このピペット法も液相重力沈降法の一つで、数10ミクロン以下の微粉体の粒度測定装置として、JIS規格に取り入れられている。測定にあたって、試料は湿潤状態のまま、プロベラ攪拌によるのみ分散させた。

光透過法とピペット法による結果を比較すると、後者のほうが小さめの値となる傾向が認められる。前者の長所は試料の乾燥重量が必要ないということである。このことは、粘着性土は乾燥すると、収縮・固結して構造が変化することを考えると、大きな長所である。操作も非常に簡単で、測定時間も一試料につき30分程度である。試料が少量で済む点は長所でもあるが、試料の代表性の見地からは短所ともなる。同一試料に対する測定結果の再現性は非常によい。アンドレア



表 3-1 底泥と粘土の種類とその物性値  
Table 3-1 List of muds and clays and results of soil test for them

Bed materials	dm ( $\mu\text{m}$ )	d50 ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_d$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma/\rho$	V.S.S (%)	Wp (%)	WL (%)	p (%)
1 Kaolin	6.5 (4.2)	5.5 (2.0)	4.7 (3.8)	2.60	2.3	38.54	51.05	12.54
2 Kaolin+Starch (5%)						34.23	46.70	12.47
3 Kaolin+Starch (10%)	7.1 (4.41)	5.0 (2.5)	6.4 (3.61)	2.48		27.87	42.28	14.41
4 Kaolin+Starch (15%)						22.68	42.54	19.86
5 Kaolin+Starch (20%)	(4.10)	(2.0)	(3.7)			16.58	45.04	28.46
6 Kaolin+Agar (5%)						33.90	155.40	121.5
7 Kaolin+Agar (10%)	(41.0)*	(22.0)	(47.0)*	2.48		49.80	225.0	175.2
8 Kaolin+Agar (15%)						57.70	246.9	189.2
9 Kaolin+Agar (20%)						49.30	329.8	280.5
10 Bentonite	14.41 (14.4)	10.0 (5.0)	16.8 (16.3)	2.60	1.63	32.95	186.5	153.5
11 Bentonite+Starch (5%)	(13.2)	(4.0)	(16.3)			24.80	167.5	142.7
12 Bentonite+Starch (10%)	16.50 (13.60)	11.0 (8.0)	16.3 (17.12)	2.48		21.74	162.5	140.8
13 Bentonite+Starch (15%)	(13.0)	(3.0)	(17.4)			22.17	164.8	142.3
14 Bentonite+Starch (20%)	(13.3)	(2.5)	(17.5)			20.73	151.2	130.5
15 Bentonite+Agar (2.5%)						29.30	242.9	213.6
16 Bentonite+Agar (5%)						29.40	276.6	247.2
17 Bentonite+Agar (10%)	(40.0)*	(27.5)	(45.0)*	2.48		34.70	250.3	215.6
18 Bentonite+Agar (15%)						39.30	316.7	277.4
19 Montmorillonite	2.1	0.8	2.2	2.60	0.64	45.3	354.0	308.7
20 Kasumi Mud 1	20.7	11.0	21.3	2.42	17.12	70.70	212.5	141.8
21 Kasumi Mud 2	(14.6)	(5.5)	(15.1)	2.59	12.10	44.50	95.9	51.4
22 Kasumi Mud 3	(9.5)	(2.5)	(15.4)			31.30	97.1	65.3
23 Kasumi Mud 4	(38.9)*	(25.0)	(27.5)*			48.40	272.2	223.6
24 Kasumi Mud 5	(36.1)	(25.0)	(30.5)	2.51	16.01	55.50	112.9	57.4
25 Kasumi Mud 6	27.2	17.5	21.3	2.61	11.48	44.20	102.8	58.6
26 Kasumi Sediment	27.7	24.9	18.8	2.28	19.00	77.7	324.9	247.2
27 Inbanuma Mud	15.4	9.5	14.5	2.51	10.64	69.0	206.0	137.0
28 Teganuma Mud	26.6	17.5	22.5	2.39	14.23	82.7	253.1	170.4
29 Ushikunuma Mud	17.3	11.5	13.1	2.36	16.41	84.0	208.8	124.8
30 Hinuma Mud	11.8	7.5	11.3	2.52	12.71	64.9	239.6	174.7
31 Suwako Mud	11.0	7.5	14.0	2.35	14.26	81.4	232.1	150.6
32 Yunoko Mud	16.5	4.0	30.1	2.08	13.69	96.4	250.6	154.2
33 Harunako Mud	34.5	25.0	28.3	2.35	15.11	81.4	150.7	69.0
34 Nakagawa Mud	47.8	15.0	119.6	2.93	11.42	39.3	119.6	80.3
35 Dojimagawa Mud	60.6	40.0	59.2	2.63	7.66	33.9	59.2	25.3
36 Tosaborigawa Mud	47.6	30.0	68.7	2.55	6.89	46.2	68.7	22.5
37 Shonaigawa Sand 1	169.0	150	33.31	2.75	1.03	-	-	-
38 Shonaigawa Sand 2	524.0	400	344.1	2.73	0.81	-	-	-
39 Neyagawa Sand	666.0	540	644	2.05	1.95	-	-	-
40 Tagonoura Sand	195.0	100	236.06	2.95	2.87	-	-	-

ゼン・ピペット法の長所は、JIS 規格法でもあり信頼性が高いこと、装置が廉価で単純であること、操作も慣れれば比較的容易であることである。短所としては、試料の乾燥重量が必要なこと、計測時間が長いこと(通常  $1 \mu\text{m}$  まで測定するためには 2 日間必要)、採水した試料の評量を含めてデータ整理が煩雑であること、などである。特に第一の短所は問題で、土の構造を変化させたくない場合は、あらかじめ含水比を求めておき、湿潤重量を測定して乾燥重量を換算する方法をとる。この時に結果に誤差が入る余地がある。両方法とも、溶媒として水を使用する場合、信頼のおける測定範囲が約  $50 \mu\text{m}$  以下である。

表 3-1 中の \* 印の付いた寒天含有土の  $d_m$  と  $\sigma_d$  の値は、 $50 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$  の間の分布を一様として求めたものである。

デンプンおよび寒天含有の影響としては、カオリナイト、ベントナイト、霞ヶ浦底泥とも、デンプン含有による粒度の変化は、あまり認められない。寒天含有によっては、 $d_m$ 、 $d_{50}$ 、 $\sigma_d$  もかなり大きくなる。光学顕微鏡写真でも、デンプン含有によっては、土粒子の結合が進んでいないこと、寒天含有によって多くの土粒子が寒天塊の内に取り込まれて粒塊が形成されているのが認められた<sup>2)</sup>。この粒塊は、写真で判定する限りでは、霞ヶ浦底泥 1 と類似した様相を示す。

湖沼泥は、No33 の棒名湖泥を除いて、 $10 < d_m < 30 \mu\text{m}$  であり、 $d_{50} < d_m \approx \sigma_d$  なる特性を持つ粒度構成が特徴である。表 3-1 の粒度分布の結果は、完全分散状態のものではないが、粒径区分を三角表示法により示すと図 3-1 となる。図中の番号は、表 3-1 に付けた土の番号に対応する。

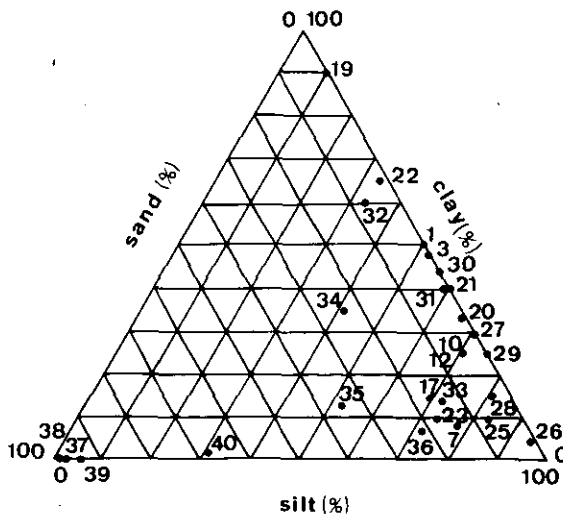


図 3-1 底泥と粘土の三角表示法による粒径区分

Fig. 3-1 Classification of mud and clay diameters by triangular soil classification system

番号の位置が、その土の粒径区分を示す。寒天含有土を除いたほとんどの粘土や湖沼泥が、右側斜辺近傍に位置し、砂分( $>74\mu\text{m}$ )が数%以下であることを示している。寒天含有土、霞ヶ浦底泥5、棒名湖泥で砂分相当粒径が15%前後となっている。霞ヶ浦底泥5は、その作成過程で気乾状態を経るため、粒度構成に変化が現れたものと考えられる。河口部泥のうち、 $w_L$ 、 $w_F$ が測定可能であったNo.34~36の泥は、砂分比が30%前後で、日本統一土質分類法<sup>5)</sup>によると、細粒土に分類される。No.38~40の河口部泥は、砂もしくは砂質土に分類される。

表 3-2 分散方法が粒度測定結果に及ぼす影響  
Table 3-2 Effects of dispersion method on the results of grading distribution

	dispersed by propeller (3mins.)				dispersed by s. sonic wave (1min.)			
	clay(%)	silt(%)	sand(%)	$d_m(\mu\text{m})$	clay(%)	silt(%)	sand(%)	$d_m(\mu\text{m})$
Montmorillonite	88	12	0	2.1	89	11	0	2.0
Inbanuma Mud	30	70	0	15.4	45	55	0	6.7
Teganuma Mud	16	82	2	26.6	44	56	0	12.4
Ushikunuma Mud	21	79	0	17.3	36	64	0	11.2
Hinuma Mud	32	68	0	11.8	50	50	0	8.5

表3-2に、分散法が粒度分布測定結果に及ぼす影響を示した。プロペラかく拌器(3分間)と超音波振動(1分間)による分散法に対する、粒径区分と $d_m$ が示されている<sup>6)</sup>。モンモリロナイトには差異が認められないが、現地泥では超音波振動による分散が顕著となり、結果に大きな差が現れることがわかる。粘着性土の粒度分布の測定結果は、試料の前処理法によって大きく影響をうけるため、研究の目的に沿ってあらかじめ、分散方法、有機物処理をするか否か、気乾させるか否かを決めておく必要がある、方法も結果とともに明記する必要がある。

### 3.1.3 比重と灼熱減量比

有機物量を示す指標として、灼熱減量比を取り上げた。自然土の含有有機物量を正確に求めることは非常に難しい。一般に重クロム酸カリ法などの化学的な有機物処理では、全ての有機物を完全に抽出することができない。また、CHN コーダによれば Total Carbon 量、Total Nitrogen 量は求めることは可能であるが、全有機物量の評価には経験的な定数を乗ずる必要がある。一方、灼熱減量法は試料を $500\sim 800^\circ\text{C}$ の高温で焼結するため、含有物は全て除去できるが、同時に、結晶鉱物中の結合水や微細粒子、さらには分解されやすい無機物質まで除去してしまう。一般に3者により求められる有機物量の結果は、灼熱減量法 $>$ CHN コーダ $>$ 化学的処理法の順となる。今回の研究では、試料を $600^\circ\text{C}$ で3時間焼結する方法を用いた。

カオリナイト、ペントナイト、モンモリロナイトのv.s.s.の値が2%前後となり、この値が結合水や分解されやすい無機物質とすれば、現地泥のv.s.s.は表3-1の結果から2%を差し引いたも

のとなる。湖沼泥は全て10%以上であり、20%近いものもある。河口部泥では、細粒土に分類されるものが7~11%、砂、砂質土に分類されるものは3%以下となった。一般に、有機物の吸着は表面反応であるため、同一量の土ならば粒径の小さなものほど表面積が大きくなり有機物を吸着しやすいとされるが、今回の結果はそれを実証している。

粘着性土の比重 $G_s$ は、v.s.s.の大きなものほど小さくなる傾向が認められる。一次鉱物の比重は、石英2.65、長石2.5~2.8、雲母2.8~3.2であり、純粋粘土の比重は、普通2.6前後となる。有機物の比重は1.2~1.7程度であるので、有機物量が増加すると土の比重が下がることは自明であり、結果の妥当性がうかがえる。

### 3.1.4 コンシステンシー指数

土の液性限界 $w_L$ と塑性限界 $w_p$ は、その土の潜在特性を判別するうえで有効で、粒度分析よりは特性をよく表すといわれている。液性限界は、加水された土のせん断抵抗に関する尺度であり、土粒子の真の粘着力を間接的に反映しており、粒子の接触面積の総和、粒子の細かさや形状、塩分濃度、交換性陽イオンなどに大きく影響される。粒子が細かく扁平になるほど、粒子間の接触面積の和が大きくなり液性限界が高くなる。このとき塑性限界値も高くなるが、液性限界ほど変化しない。

粘土では液性限界はモンモリロナイト>ベントナイト>カオリナイトの順となっている。各粘土とも、デンプン含有によって、液性限界は大きくは変化しないが、含有率の増加とともに若干下がる傾向がある。塑性限界も同様である。寒天含有によっては、液性限界は100~280%程度も大きくなり、含有率の増加とともに値も大きくなる。一方、塑性限界は、含有率に対して若干の増加傾向があるがほとんど変化しない。そのため液性限界と塑性限界の差で定義される塑性指数 $I_p$ も100~280%大きくなり、可塑性が増大している。松尾・嘉門<sup>7)</sup>も、有機物を調整したヘドロに対して同様の傾向を得ている。寒天含有の場合に、液性限界が含有率とともに増加するのは、寒天の高分子化合物としての何らかの立体網目構造が原因と考えられる。含有率が大きいほど、網目構造の結合部がふえ、粘着力が増すため液性限界が高くなると考えられる。塑性限界があまり変化しない理由は明確でない。霞ヶ浦底泥の場合は、有機物除去によって液性限界が半減し、塑性限界も20~30%減少した。その結果、塑性指数が80%程度減少し、粘着力、可塑性とも低下したことがわかる。デンプン、寒天含有による変化は、粘土の場合と同様の結果となった。

湖沼泥の場合、液性限界は棒名湖泥を除いて200%以上で、塑性指数も120~170%程度である。図3-2に塑性図を示した。すべての土が

$$I_p = 0.73 (w_L - 20) \quad (3-3)$$

で定義されるA線の近傍もしくは上側に位置する。このことは、液性限界が高いものほど可塑性も大きくなることを示す。現地泥はA線の下側近傍に集中している。デンプン含有土は、もとの粘土とほぼ同じ位置となり、寒天含有土は、A線より比較的上側に位置し、通常有機質土がA

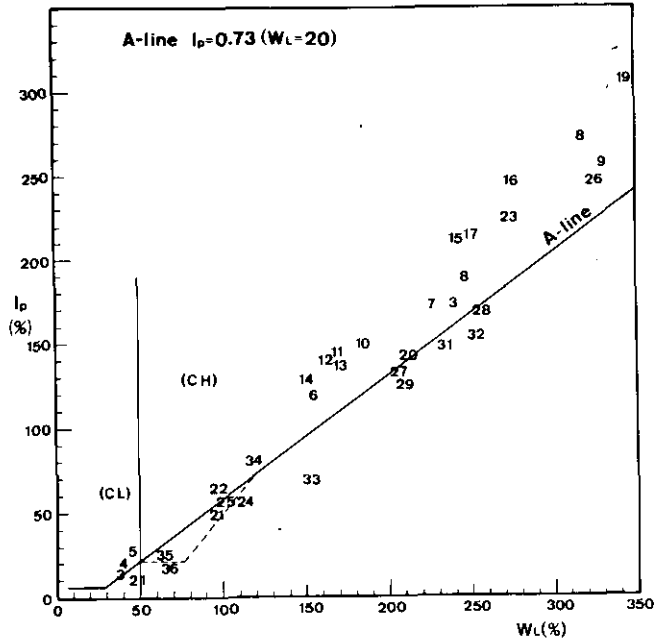


図 3-2 底泥と粘土の塑性図

Fig. 3-2 Plasticity chart of muds and clays

線の下側に位置する点で違いが見られる。この点に、即席的な合成有機土と、長時間かけて自然の複雑なメカニズムによって生成される自然土との間の差が現われている。

物性間関係としては液性限界、塑性指数と灼熱減量比や比重の間には高い相関が認められる。このことは、有機物質が土の粘着性に寄与していることを反映している。

### 第3.2節 結論

本章では、底泥の物理化学的性質について言及した。底泥の物理化学的性質の多くは表面反応であり、表面の性質が深く関与している。底泥の物理化学的性質を示す諸要素のうち、表面に関与しないものは、有機物を除去して完全分散状態にした場合の、粒子の比重、粒度分布、形状などである。また多くのものは、含水比の影響を受ける。本章では含水比の影響を受けない物理化学的性質として、粒度分布、比重、灼熱減量比、コンシステンシー指数を求めその特徴を考察した。底泥は、ほとんどが細粒土に分類される粒度構成をもち、中央粒径 < 平均粒径 = 標準偏差なる特性を示す。湖沼泥の重量分布から求めた平均粒径はおおむね  $10 \sim 30 \mu\text{m}$  の値を示す。また粘土にデンプン含有させても、粒度はほとんど変化しないが、寒天を含有させると約  $40 \mu\text{m}$  とかなり大きくなる。湖沼泥の比重は  $2.1 \sim 2.5$  程度、灼熱減量比は  $10 \sim 20\%$  程度であった。灼熱減量

が高いものほど比重は小さくなる傾向がある。これは、粘土鉱物の比重が2.6～3であるのに対して、有機物の比重が1.2～1.7であるためである。河口部泥は、灼熱減量比は7～11%となり、砂質土では3%以下となった。土のコンシステンシー指数は、その土の潜在特性を判別するうえで有効な指標である。土の性質は、液性限界と塑性指数で論議される。液性限界は加水された土のせん断抵抗力に関する尺度、塑性指数は可塑性の尺度として考えられている。有機物を含まない粘土では液性限界はモンモリロナイト>ベントナイト>カオリナイトの順となる。デンプン含有によって液性限界も塑性指数も若干低下する。寒天含有によって液性限界も塑性指数も100～280%大きくなり含有率が大きいものほど増大する。霞ヶ浦底泥の場合、有機物除去によって液性限界も塑性指数も大きく減少し、粘着力、可塑性が低下する。湖沼泥の場合、液性限界はほとんど200%以上であり、塑性指数も120～170%と高い。対象としたすべての底泥が、 $I_p=0.73(w_L-20)$ で定義されるA線近傍に存在した。液性限界および塑性指数は、灼熱減量比と正の高い相関が、比重と負の高い相関が認められる。

#### 参 考 文 献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄(1980):粘性土の限界掃流力について,第16回衛生工学研究討論会講演論文集,140-146.
- 2) 村岡浩爾・大坪国順(1980):底泥の限界掃流力に関する実験的研究,国立公害研究所研究報告,第14号,33-55.
- 3) 大坪国順・相崎守弘・福島武彦(1981):底泥の限界掃流力と巻き上げ量について,国立公害研究所調査報告,第16号,65-77.
- 4) 粉体工学研究会編(1975):粒度測定技術,日刊工業新聞社.
- 5) 土木学会編(1974):土木工学ハンドブック,上巻,技報堂,259.
- 6) 大坪国順・村岡浩爾(1981):底泥の限界掃流力と物性の関連について(II),土木学会第36回年次学術講演会講演概要集第2部,3-4.
- 7) 松尾新一郎・嘉門雅史(1973):物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について,土木学会論文報告集,第209号,103-113.

## 第4章 底泥の沈降特性

### 第4.1節 概説

底泥の沈降は底泥の重要な物性である。その特性は、土の分散・凝集現象と深く関係している。単分散もしくは部分的集合体が分散している場合には、それらの粒子がおのおのの独立に沈降する。土粒子が系全体にわたる構造を作る場合、独立沈降はなくなり土粒子が互いに干渉し合って沈降する。土粒子分散系の沈降過程では、図4-1に示すような、沈降粒子上端に現れる沈降面と、沈降粒子下部に現れる沈積面とが区別される。しかし、粒子の種類や初期濃度によっては、片方の面しか現れない。安定は単分散のような場合には、沈降面は拡散的になり明瞭でなく、沈積面が明瞭に現れる。一方、全体にわたる構造をもつような場合、沈降面は明瞭であるが沈積面は明瞭ではない。前者を自由沈降、後者を凝集沈降とよぶ。沈降面は界面とも呼ばれ、凝集沈降は、界面沈降とも呼ばれる。界面沈降速度は自由沈降速度より小さく、その度合は初期濃度が高いほど大きい。沈降面はやがて沈積面と同じになるが、これ以降では全ての土粒子が何らかの形で接触し自重を伝達するために、自重による圧密沈降過程へ移行する。圧密沈降量は凝集性の高いものほど大きくなる傾向がある。時間が十分経過し、圧密がほぼ完了したと思われるときの、みかけの体積 $V_0$ とそのときに沈積した土の乾燥重量 $W_0$ の比 $S_d = V_0/W_0$ を沈降体積という。この値は土が分散していると小さく、団粒化していたり、粘土や腐植の和湿度が高いほど、和湿度による膨張が大きいほど大きい。

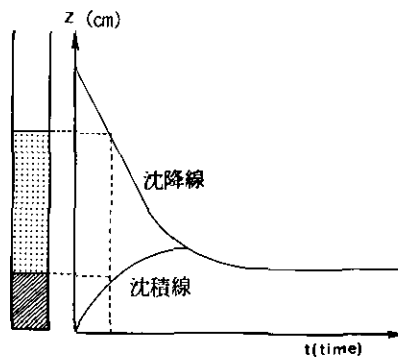


図 4-1 沈降線と沈積線

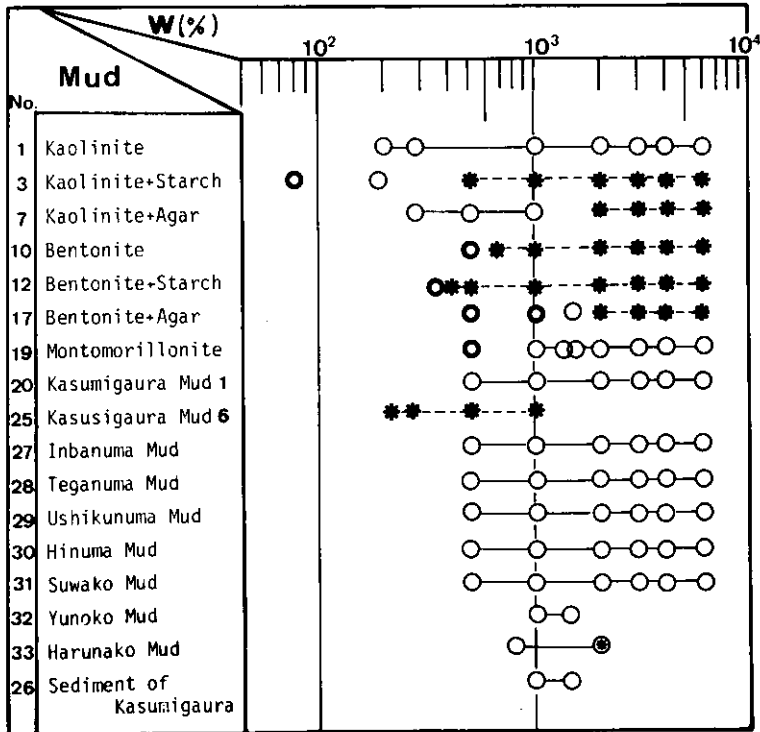
Fig. 4-1 Settling curve and the depositing curve

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、他の物性量とともに流速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静水沈降実験を行ない、底泥の種類、初期含水比 $w_0$  (濃度 $C_0$ )、初期高さ $H_0$ が、沈降曲線、最終圧密高さ $H_\infty$ や最終状態での沈積した底泥の含水比 $w$ の鉛直方向特性に及ぼす影響を検討した。界面沈降を示したものについて、 $H_\infty/H_0$ 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たので、その理由を主にカオリナイト、ベントナイト、モンモリロナイトを対象を選んで考察した。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になったので、沈降現象を記述する方程式を導き、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求め、間隙比と有効圧力の間に対数関係を仮定することによって、その解が実験結果を定性的に説明できることを示した。

表 4-1 底泥の種類と沈降形態

Table 4-1 List of muds exercised settling experiment and the settling modes of them





第4.2節 実験条件及び方法<sup>1),2)</sup>

実験を行なった底泥の種類を表4-1に示す。以後記述においては、特にことわらないかぎり、粘土も含めて一括して底泥と称する。実験に用いた沈降筒は、内径6cmの透明アクリル円筒である。沈降筒の下部は図4-2(a)に示すように、二重栓になっている。実験終了後に、下のゴム栓を抜き、図4-2(b)に示すように、残ったもう一つのゴム栓ごと底泥を押し出すことによって、最終状態での底泥の含水比測定用のサンプルを採取する。

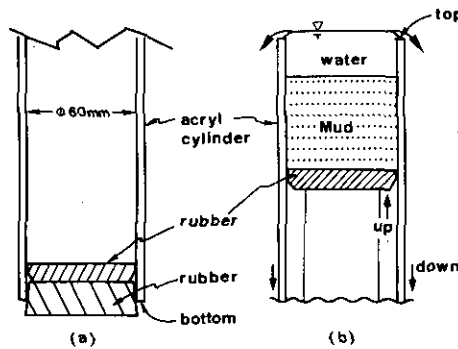


図 4-2 沈降筒下部の仕組と底泥試料の採取方法

Fig. 4-2 Setup of the bottom part of the settling cylinder and the sampling method of mud

実験の手順は次のようである。蒸留水を加えて初期含水比に調整し、24時間水に浸漬させた後、5分間かく拌して均一にする。それを沈降筒に流し込み蓋をして静置する。この時刻を実験開始時刻として、その後適当な時間間隔で、界面高さもしくは沈積面高さを測定する。今回の実験では原則として6日後(144時間後)を最終状態とした。実験終了後は前述の方法で底泥のサンプルを採取した。初期沈降高さは23.0 cmと11.5 cmの2種類とした。初期含水比は表4-1の◎、○および\*印の位置で示される。表中の含水比表示は対数座標を採用している。

## 第4.3節 底泥の沈降形態

表4-1は、各底泥の沈降形態を初期含水比 $w_0$ によって分類したものである。沈降形態には初期高さの影響は現れなかった。◎印は、実験開始から終了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も鉛直方向に変化していなかった。この状態は、斥力が主要な粒子間力である底泥では、この斥力が自重に抗するために、凝集力が強い底泥では形成された構造の結合力が自重に抗するために、実現されると考えられる。○印は、界面が現われ、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、粒径

の大きいものが沈降して沈積面を形成し、その高さがゆっくり増加したものである。この場合、沈積面の上部に高濃度の懸濁液が存在した。

底泥別に沈降形態の特徴を記すと次のとおりである。カオリナイトは全条件で○印となった。デンプン含有によって、 $w_0 > 190\%$ では界面が現れず、 $w_0 = 190\%$ で界面が現れ、 $w_0 = 80\%$ で◎印となった。寒天含有の場合、界面の現れる上限は  $1000 < w_0 < 2000\%$ に存在する。ベントナイトとデンプン含有ベントナイトはどの $w_0$ でも界面は現れなかった。寒天含有の場合は◎印となる $w_0$ の値がベントナイトの場合の2倍近く上昇し、 $w_0 = 1500\%$ で界面が現れた。 $w_0 = 2000\%$ では自由沈降となったので、 $1500 < w_0 < 2000\%$ に界面が現れる上限があると推測される。デンプンや寒天含有によって沈降形態が変化した理由はのちに述べる。写真4-1は最終状態(6日後)の一例である。条件は $H_0 = 23.0$  cm,  $w_0 = 4000\%$ である。デンプン含有カオリナイト, 寒天含有カオリナイト, 全てのベントナイト主成分粘土で沈積面が現れ, 他の底泥では界面が現れている。

湖沼泥は、今回の $w_0$ の範囲では棒名湖泥を除いて全て○印となった。棒名湖泥は $w_0 = 2000\%$ が干渉沈降と自由沈降の遷移域になったが、これは $d_m$ が $34.5 \mu\text{m}$ と大きいこと、気乾状態を経た試料であったためである。乾燥状態を経た底泥は、同一含水比でも生土より $w_L$ ,  $I_p$ , 粘度が低下することが知られる。霞ヶ浦底泥の遷移域は、 $w_0 = 10000\%$ 付近であった。Kasumi Mud 6\*は $w_0 = 235\%$ という低い値でも界面は現れなかった。沈積した底泥は非常に固く、含水比は50%程度であった。この底泥は非常に固く、均一になりにくい、いったん均一に分散したものは粘度が小さいのが特徴である。

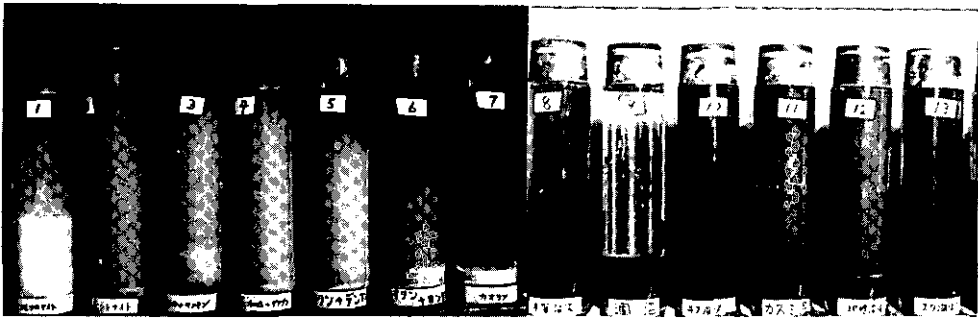


写真 4-1 底泥及び粘土の最終沈降状態(6日後,  $w_0 = 4000\%$ ,  $H_0 = 23.0$  cm)  
Photo 4-1 Final settling states of muds and clays (6 days after,  $w_0 = 4000\%$ ,  $H_0 = 23.0$  cm)

\* 腐植除去泥

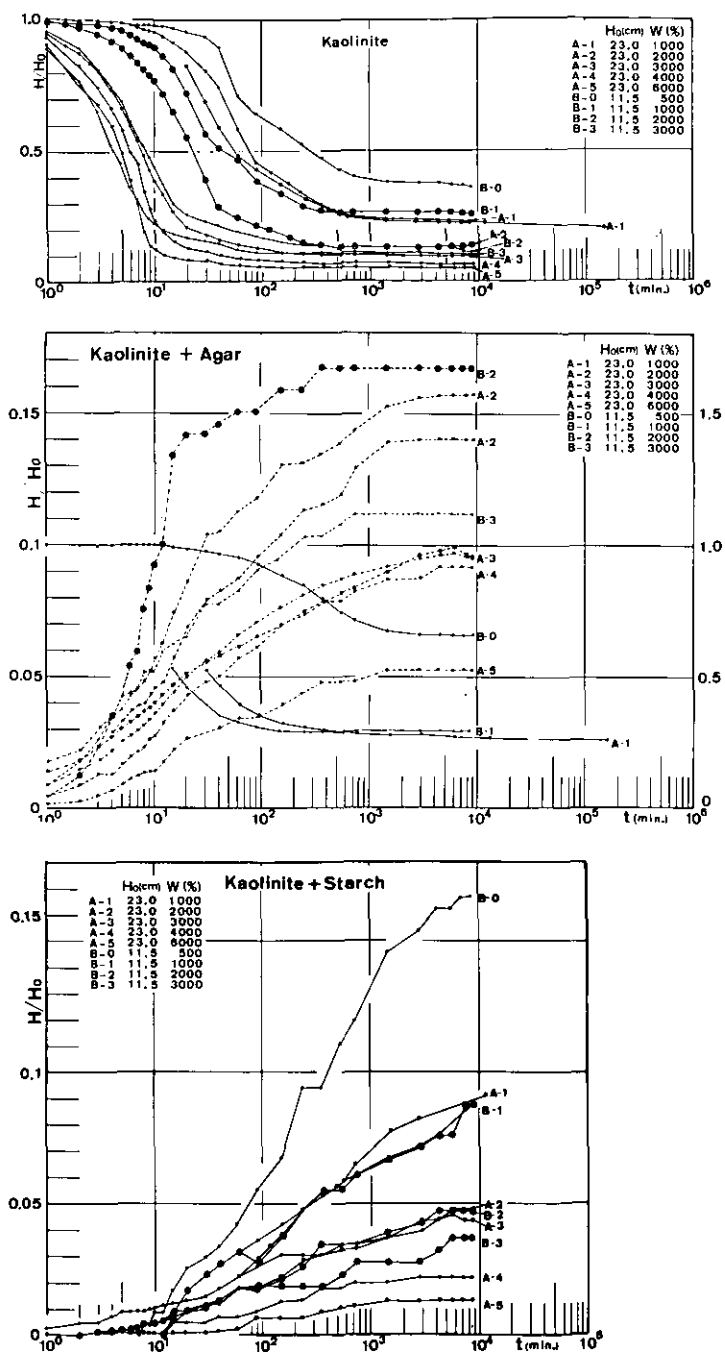
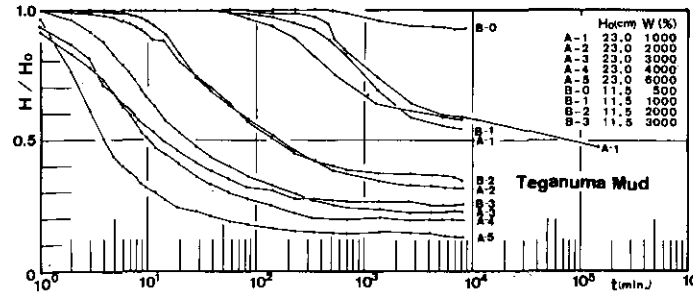
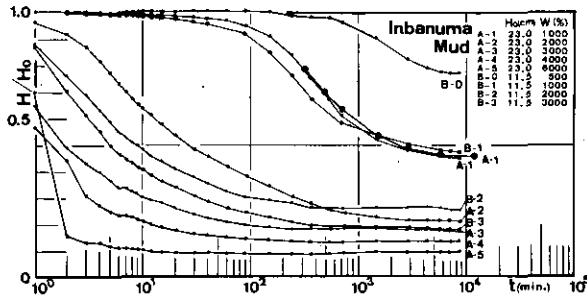
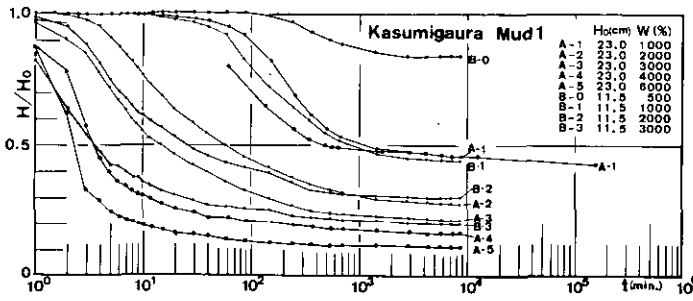
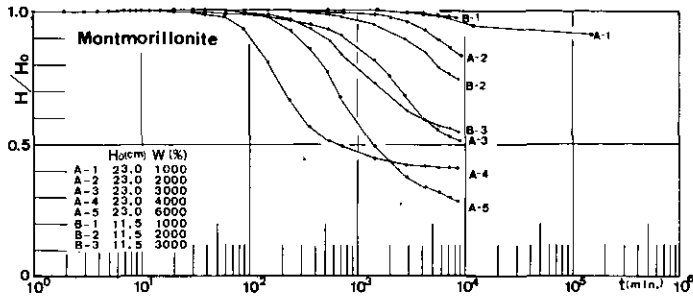


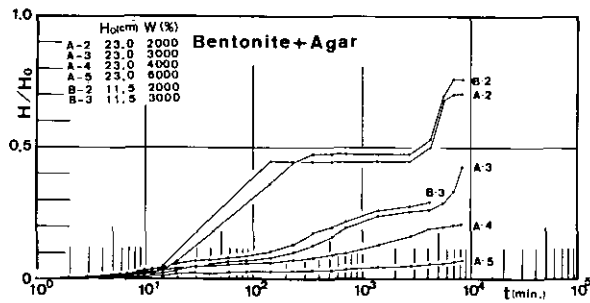
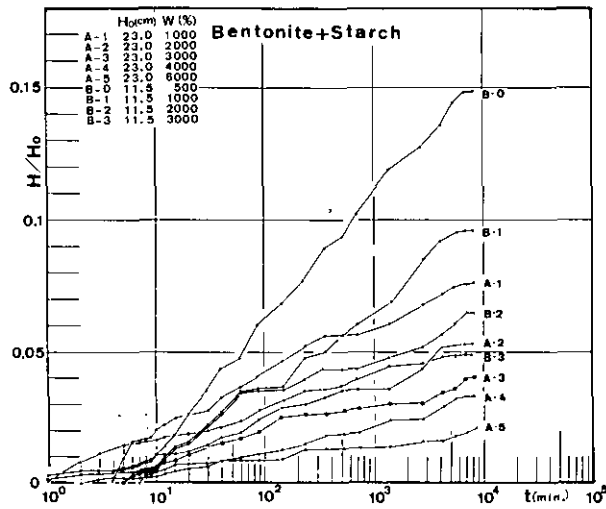
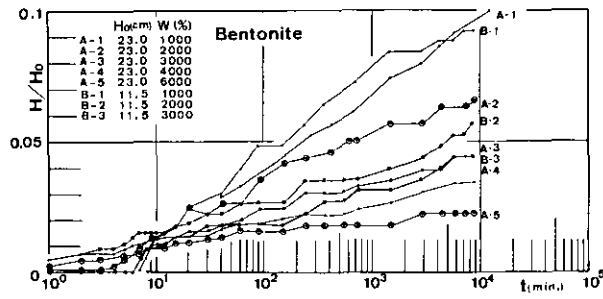
図 4-3 底泥の沈降曲線 (初期含水比及び初期高さの影響)

Fig. 4-3 Settling curves of muds (The variance caused by initial water content in percent of dry weight and initial settling height)



☒ 4-3 (つづき)

Fig. 4-3 (Continued)



☒ 4-3 (つづき)

Fig. 4-3 (Continued)

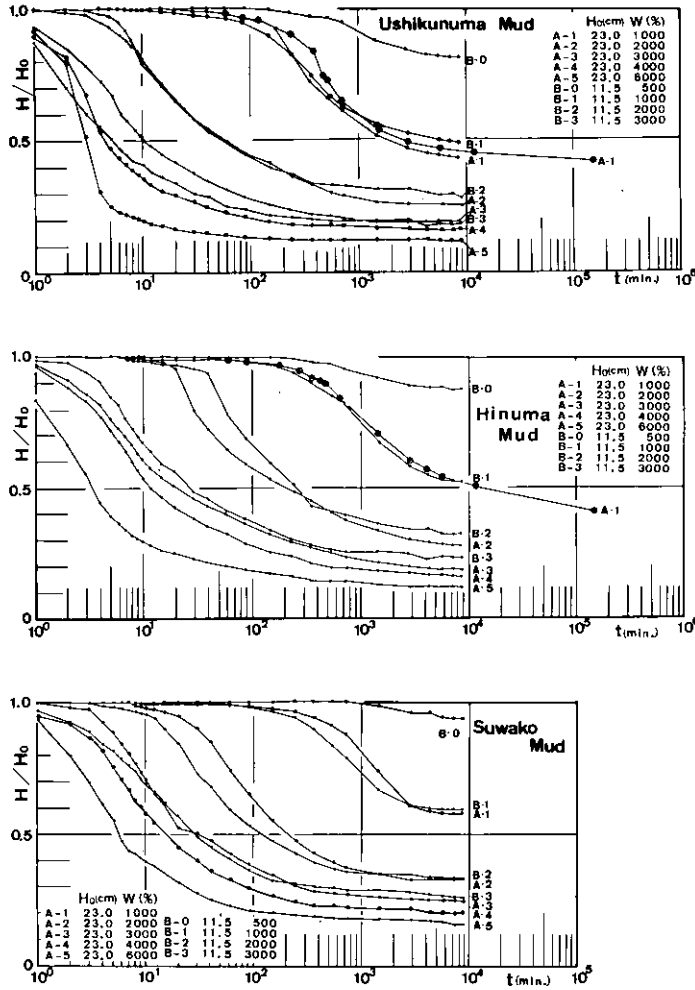


図 4-3 (つづき)

Fig. 4-3 (Continued)

#### 第 4.4 節 界面及び沈積面の時間変化と最終状態

##### 4.4.1 界面及び沈積面の時間変化

図 4-3 の一連の図は、各底泥における界面及び沈積の時間を示したものである。界面の場合は時間とともに下降し、沈積面の場合は時間とともに上昇する。寒天含有カオリナイトの場合、沈降線を実線で、沈積線を破線で示した。両者とも  $H_0$  で無次元化してある。この場合、左側に沈積面高さ、右側に界面高さの座標を示す。曲線の右端にある記号は実験条件を示し、その条件は図中の表に示されている。A シリーズは  $H_0 = 23.0$  cm, B シリーズは  $H_0 = 11.5$  cm である。同一条件

での実験も数ケースあり、再現性は比較的よいことがわかる。界面の現れた底泥は、モンモリロナイトを除いて、 $w_0 \geq 2000\%$ の条件で、24時間後にはほぼ最終状態に落ち着いている。 $w_0$ が大きいほど、最終状態に落ち着く時間は早くなる。 $w_0 = 1000\%$ の条件では、110日後でも圧密が完了していない底泥もあるが、一応6日後を最終状態ととれば十分と考えられる。沈積面の現れた場合も同様である。

今回は主に界面沈降の結果について述べる。すべての底泥において、 $H_0$ が同じ条件では、 $w_0$ が小さいものほど $H_\infty/H_0$ が大きく、同一時刻における $H/H_0$ も大きい。一方、 $w_0$ が大きく同じ条件では、 $H_\infty/H_0$ の値は、ほとんどの場合 $H_0 = 11.5 \text{ cm}$ のものがわずかに高い。

#### 4.4.2 界面沈降に及ぼす底泥の影響

図4-4の一連の図は、 $H_0$ 、 $w_0$ が同じ条件で、底泥による界面の時間変化の違いを比較したものである。 $w_0$ 、 $H_0$ が同じでも、底泥によって $H_\infty/H_0$ がかなり異なることがわかる。最終状態に到るまでの $H/H_0$ の値は、必ずしも $H_\infty/H_0$ の大きい底泥が大きな値とはなっていない。例えば、カオリナイトは $w_0 \geq 1000\%$ では、10分前後までは一部の底泥より $H/H_0$ の値は大きい、 $H_\infty/H_0$ は必ず最小である。また洞沼泥は $w_0 = 2000, 3000\%$ の場合、24時間程度までは $H/H_0$ は大きい、それ以後は圧密の進行が速く、 $H_\infty/H_0$ は諏訪湖沼や手賀沼泥より小さくなる。 $w_0$ の値によって、底

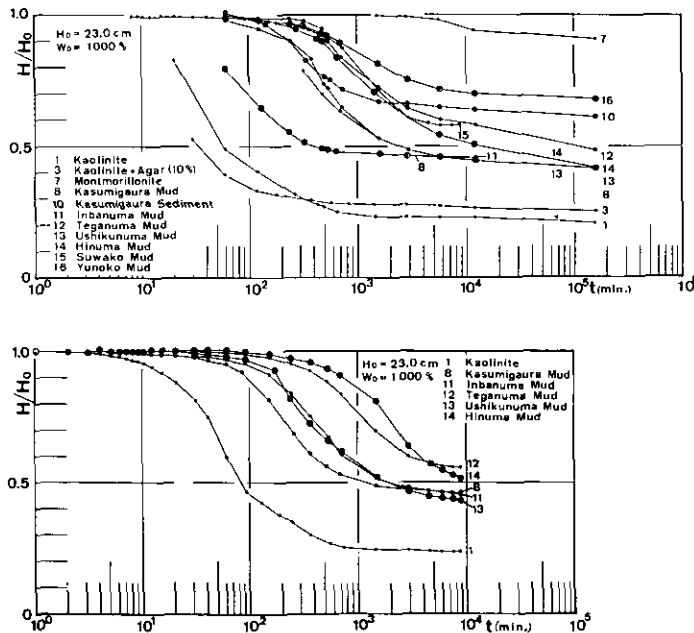
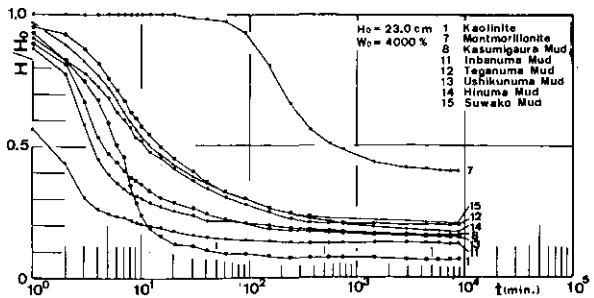
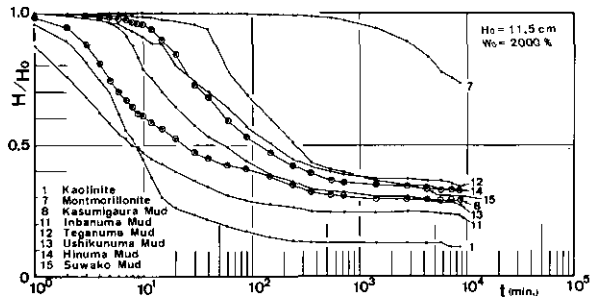
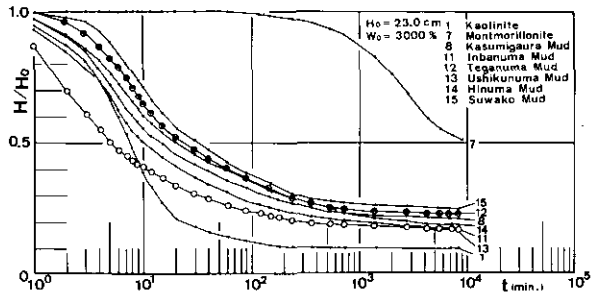
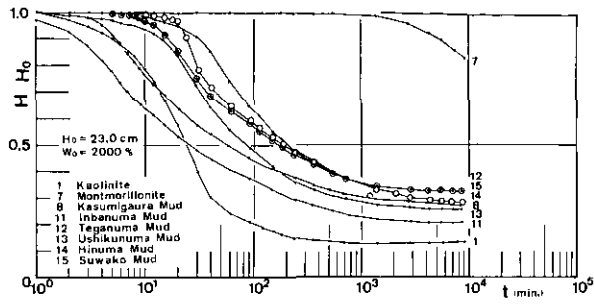


図 4-4 底泥の沈降曲線 (底泥の種類の影響)

Fig. 4-4 Settling curves of muds (The variance caused by mud's kinds)



☒ 4-4 (つづき)  
Fig. 4-4 (Continued)



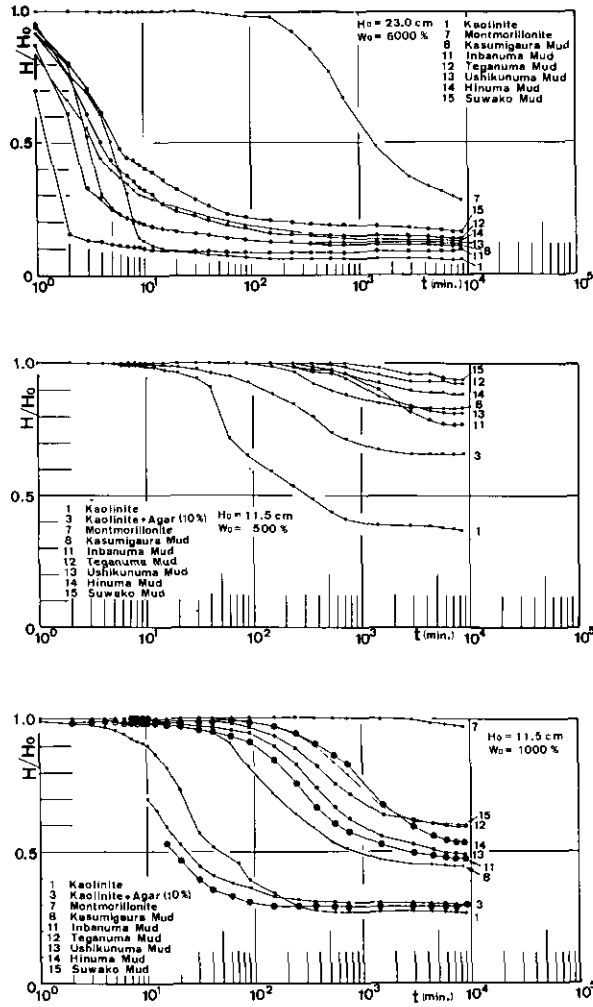


図 4-4 (つづき)  
Fig. 4-4 (Continued)

泥の粒度構成や分散・凝集特性が網目構造の形成に微妙な影響を与え、このような結果が現れたと思われる。

#### 4.4.3 最終状態の特性

図 4-5 は、 $H_0 = 23.0$  cm の場合の、 $H_\infty/H_0$  と  $w_0$  との関係を示したものである。各底泥とも、係数は異なっているが

$$H_\infty / H_0 \propto w_0^{-4/5} \quad (4-1)$$

の関係が認められる。係数の値は、 $w_0$ の大きな底泥ほど大きくなる傾向がある。含水比 $w$ と重量濃度 $C$ (kg/l)には次の関係がある。

$$C = \frac{\rho}{\left(\frac{1}{G_s} + \frac{w}{100}\right)} \quad (\text{kg/l}) \quad (4-2)$$

ここで $G_s$ :土の比重、 $\rho$ :水の密度である。式(4-2)は、 $w_0$ が大きな値の場合 $C_0$ はほぼ $w_0$ に反比例することを示す。一方 $H_0$ が一定の場合、底泥の乾燥重量 $W_s$ は $C_0$ に比例するので、図4-5の関係は

$$H_\infty/H_0 \propto W_s^{\alpha_0} \quad (\alpha_0 \doteq 4/5) \quad (4-3)$$

と書き換えられ、 $H_\infty$ が $W_s$ に正比例しないことを示す。

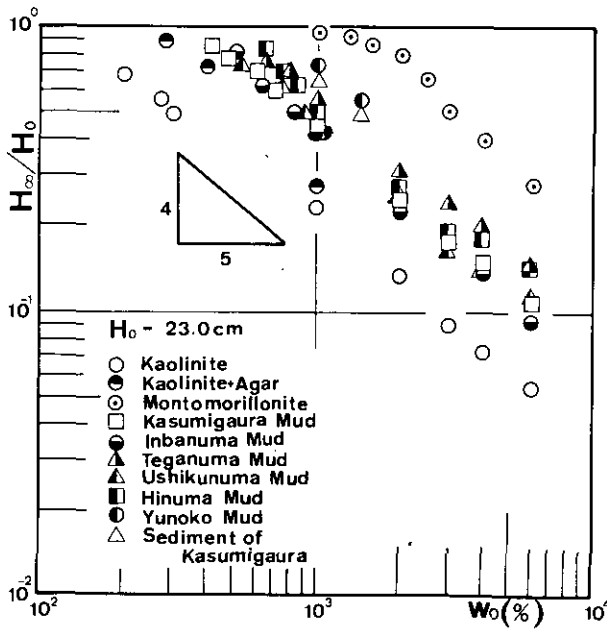


図 4-5 最終沈降体積比と含水比の関係

Fig. 4-5 Relationships between the final settling volume ratio and water content in percent of dry weight

図4-6の一連の図は、 $H_0=20.0$  cmで初期状態での底泥の粘度 $\eta_1$ を同一にした場合の、界面の時間変化曲線である。この条件の場合、 $w_0$ は底泥によって異なる。各底泥の $H_\infty/H_0$ の値は比較的近い値に収まっている。表4-2は粘度 $\eta_1$ ごとに、各底泥の $H_\infty/H_0$ の値を整理したものである。 $\eta_1=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ の場合のモンモリロナイトの値が他の値とかけ離れているが、これはモンモリロナイトが最終状態になっていないためと思われる。

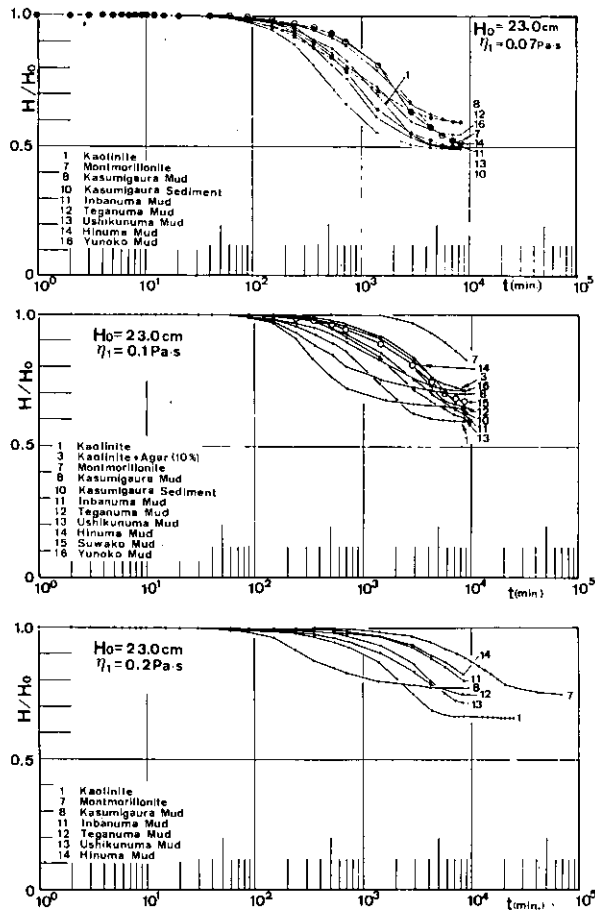


図 4-6 底泥の沈降曲線 (初期状態の粘度一定の条件)  
 Fig. 4-6 Settling curves of muds (on the condition that viscosity  $\eta_1$  at the first stage are the same)

表 4-2 粘度  $\eta_1$  と最終沈降体積比の関係  
 Table 4-2 Relationships between the viscosity  $\eta_1$  and the final settling volume ratio

Mud	$H_\infty/H_0$		
	$\eta_1$ (Pa·s)		
	0.07	0.1	0.2
Kolinite	0.50	0.60	0.67
Montmorillonite	0.52	0.83	0.75
Kasumi. Mud 1	0.60	0.70	0.77
Inbanuma Mud	0.51	0.63	0.80
Teganuma Mud	0.59	0.66	0.75
Ushikunuma Mud	0.50	0.62	0.72
Hinuma Mud	0.52	0.65	0.83
Suwako Mud	—	0.67	—
Yunoko Mud	0.55	0.65	—
Sediment of Kasumi.	0.49	0.71	—

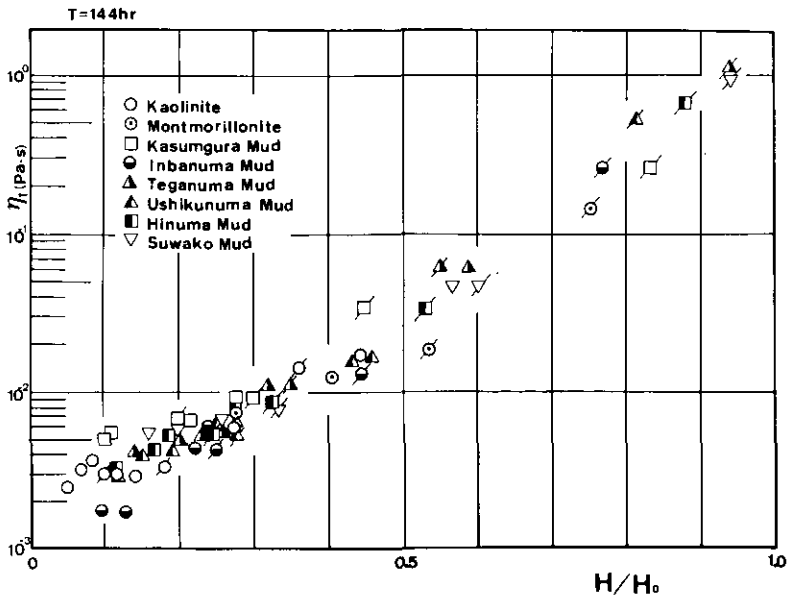


図 4-7 最終沈降体積比と粘度  $\eta_1$  との関係

Fig. 4-7 Relationships between the final settling volume ratio and the viscosity  $\eta_1$

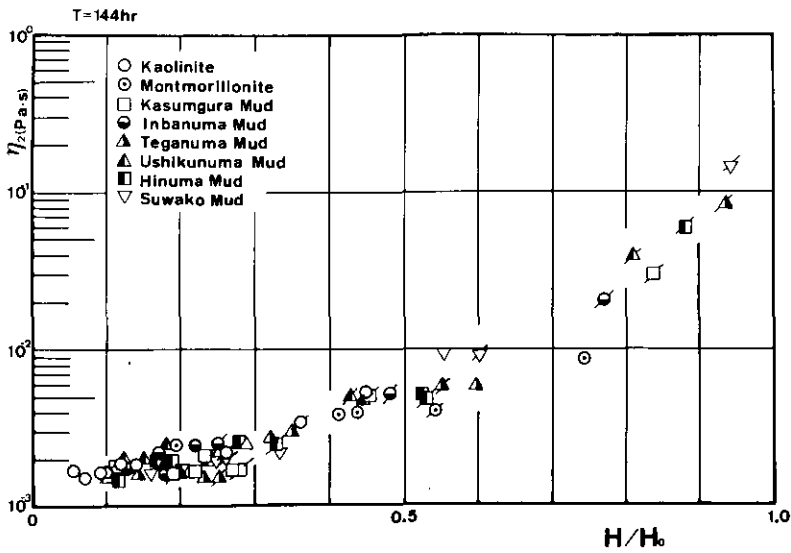


図 4-8 最終沈降体積比と粘度  $\eta_2$  との関係

Fig. 4-8 Relationships between the final settling volume ratio and the viscosity  $\eta_2$

図4-7は界面沈降の場合の $H_{\infty}/H_0$ と $\eta_1$ の関係を示したものであり、図4-8は $H_{\infty}/H_0$ と $\eta_2$ の関係を示したものである。 $\eta_1$ と $\eta_2$ は図4-9の模式図で定義される粘度\*である。底泥の種類と記号の関係は、図4-7、図4-8中の表で示す。記号にヒゲのついたものは $H_0=11.5$  cmの結果を、ヒゲのないものは $H_0=23.0$  cmの結果を示す。 $H_0=11.5$  cm, 23.5 cmの両方とも、 $H_{\infty}/H_0$ はそれぞれ $\eta_1$ と $\eta_2$ との間に一定の関係が認められる。モンモリロナイトは、 $H_{\infty}/H_0$ が真の最終状態の値ではなく大きめなので、図では下にバラツキぎみになっている。 $H_0$ の影響は今回の条件の範囲ではデータのバラツキもあり明確でない。少なくとも $H_0$ が同じ条件での $H_{\infty}/H_0$ は $\eta_1$ および $\eta_2$ で整理できると考えてよい。

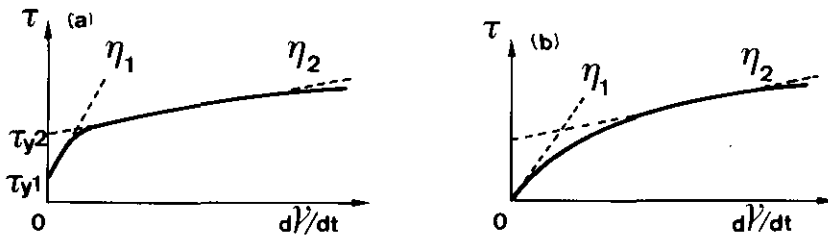


図 4-9 粘度  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  の定義  
Fig. 4-9 Definitions of the viscosity  $\eta_1$  and  $\eta_2$

大垣ら<sup>3)</sup>も懸濁液の粘度が懸濁液の種類によらず、最終沈降体積率 $H_{\infty}/H_0$ から求めたみかけの体積分率 $\phi'$ によって、統一的に表現できるとしている。そして、北浦、長瀬<sup>4)</sup>の実験結果などから、最終沈降体積が粘度に対する一つの有効な濃度指標であると結論づけている。

#### 4.4.4 自重圧密の影響

自重圧密の影響について検討する。表4-3は、 $H_{\infty}$ の結果をもとに自重圧密の影響をみたものである。 $r_H$ は $w_0$ が同一の条件で、次式より求まる値である。

$$r_H = (H_{\infty}/H_0)_B / (H_{\infty}/H_0)_A \quad (4-4)$$

ここで、下つき記号のA, Bはそれぞれ $H_0=23.0$  cm,  $H_0=11.5$  cmの場合を示す。以下もこれに順ずる。 $w_0$ が同一の条件では、底泥乾燥重量 $W_s$ には、 $W_{sA} = 2W_{sB}$ の関係がある。自重による圧密が起こらなければ、 $r_H=1$ となるべきであるが、結果はほとんどの場合 $1 \leq r_H < 1.1$ となる。自重圧密により、 $W_s$ の大きなものが底泥下部でより締まるために、 $H_{\infty}/H_0$ の値が小さくなったと考えられる。図4-10は、底泥の最終沈降状態での含水比の鉛直分布を示したものであるが、それが深さとともに低下しており、自重圧密の効果が明確に現れている。

\* 第5.3節5.3.2を参照

表 4-3 最終沈降体積比に及ぼす底泥の乾燥重量の影響  
 Table 4-3 Effects of mud dry weight on the final settling volume ratio

$r_H$	$w_0$ (%)		
	1000	2000	3000
Mud			
Kaolinite	1.13	1.00	1.05
Montmorillonite	1.01	1.00	1.07
Kasumi. Mud I	0.98	1.06	1.09
Inbanuma Mud	1.05	1.11	1.06
Teganuma Mud	1.04	1.06	1.10
Ushikunuma Mud	1.05	1.08	1.06
Hinuma Mud	1.00	1.10	1.18
Suwako Mud	1.04	1.03	1.06

表 4-4 最終沈降体積比に及ぼす初期含水比の影響  
 Table 4-4 Effects of initial water content in percent of dry weight on the final settling volume ratio

$f_H$	$W_s$ (g)			
	62.6	32.0	16.1	10.8
Kaolinite	0.78	0.93	0.87	0.92
Montmorillonite	0.57	0.63	0.91	0.94
Kasumi. Mud I	0.92	0.71	0.97	0.90
Inbanuma Mud	0.88	0.98	0.98	0.95
Teganuma Mud	0.79	0.84	0.87	0.93
Ushikunuma Mud	0.91	0.85	0.93	0.83
Hinuma Mud	0.85	0.94	0.97	0.96
Suwako Mud	0.83	0.93	0.87	0.84

表4-4は、 $W_s$ が同一の条件で、最終状態に及ぼす $w_0$ の影響を示したものである。この条件は、 $w_{0A} = w_{0B}$ の組み合わせによって実現される。式(4-2)より、 $C_0$ は厳密には $w_0$ に反比例しないが、 $w_0$ が大きいので $1 < W_{SA}/W_{SB} < 1.03$ となる。 $f_H$ は次式で定義される値である。

$$f_H = H_{\infty B} / H_{\infty A} \quad (4-5)$$

全ての条件において、 $f_H < 1$ となり、その値は、 $1 < W_{SA}/W_{SB} < 1.03$ を考慮しても、有意である。即ち、 $W_s$ の同一の条件では、 $C_0$ が小さいもの( $w_0$ が大きいもの)ほど $H_{\infty}$ が大きくなることを示している。この事実は図4-10の結果にも現れている。最終状態での含水比の鉛直分布は、 $w_0$ が大きいものほど $w$ の値も大きく、界面下5cm以内での変化が大きい。また $W_s$ が同一であっても、 $w_0$ の大きなものが、同一界面下での $w$ の値が大きくなっており、圧密の度合が異なることを示す。

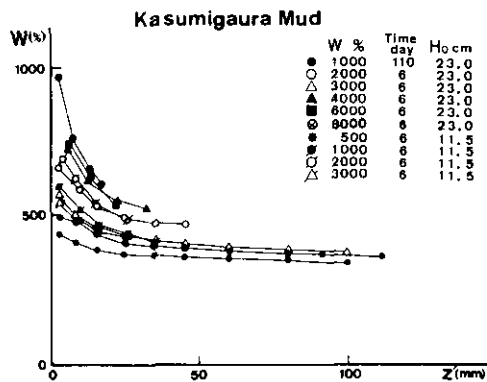
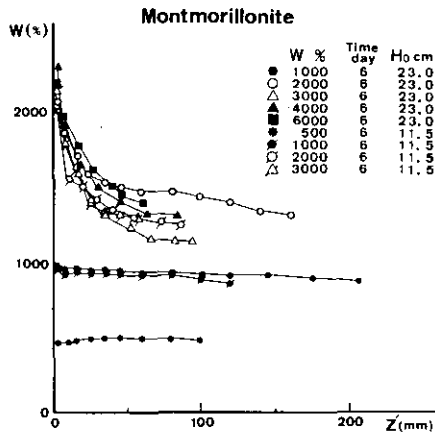
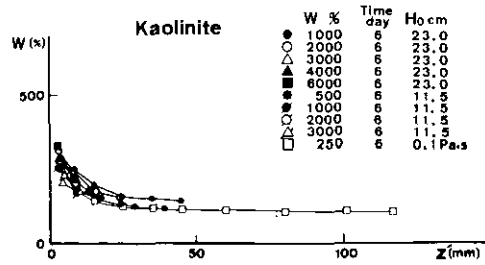
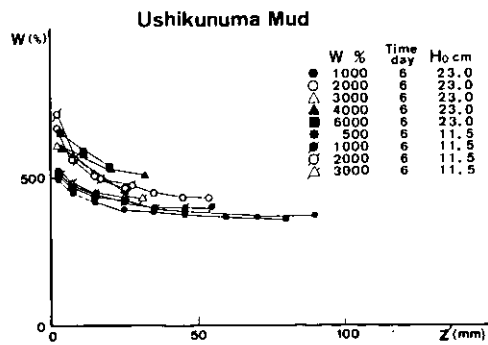
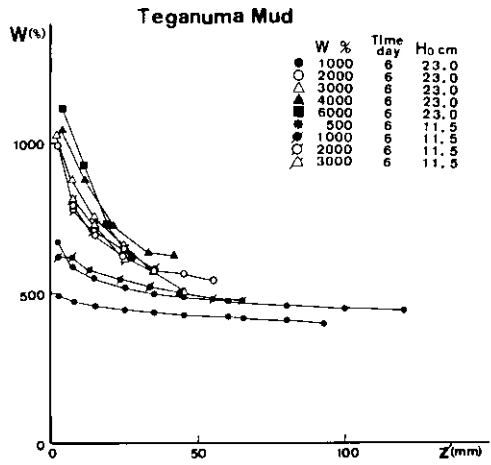
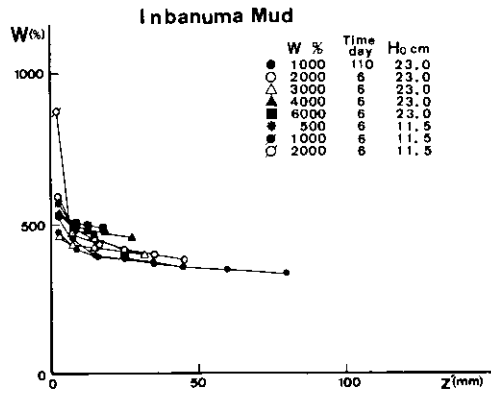


図 4-10 最終沈降状態における底泥の含水比の鉛直方向分布

Fig. 4-10 Depth profile of mud water content in percent of dry weight at the final settling stage



☒ 4-10 (つづき)  
Fig. 4-10 (Continued)



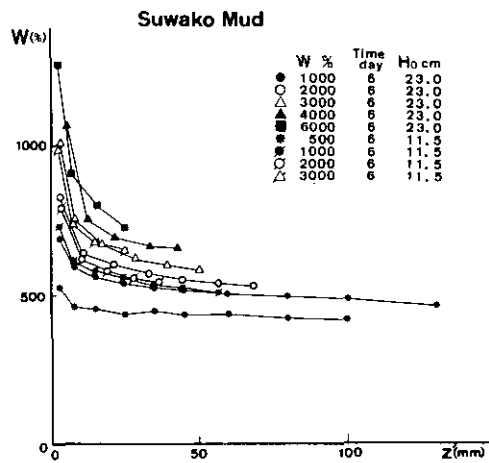
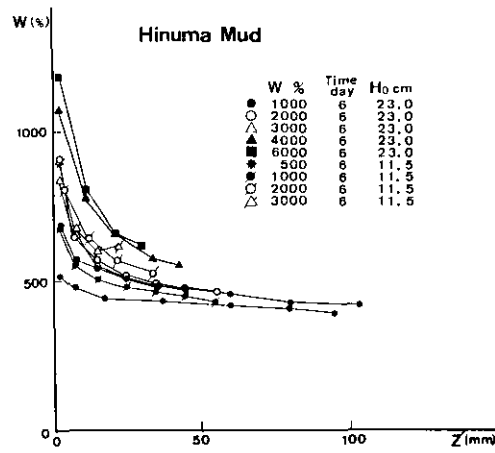


図 4-10 (つづき)

Fig. 4-10 (Continued)

$w_0$ が同一の条件では、同一面下での $w$ がほぼ等しくなる。これらの特徴は $H_\infty$ が大きくなる底泥ほどその傾向が大きく、カオリンでは $w_0$ の影響が明らかでない。

#### 第4.5節 土粒子の分散および凝集

表4-1, 写真4-1および図4-3示したように、 $w_0$ が同じでも底泥は種類によって沈降形態が

異なる。また、有機物除去のための化学的処理や、有機物含有によっても沈降形態が変化する。これらの現象の起こる要因を探り、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する。これらの粘土は、組成が明確で、さらに有機物等による複雑な影響を無視できるので、土粒子の表面状態の考察が単純化できる。

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。分散、凝集は土粒子の種類、濃度、吸着陽イオンの種類、電解質の種類や濃度、保護コロイドの有無などに大きく影響をうけると考えられる。

#### 4.5.1 底泥中の水分

底泥の分散、凝集は何らかの溶液中で起こる現象であるから、土粒子が溶液に接している場合の特性が重要となる。底泥中の水は一般に自由水（重力水、毛管水）と吸着水、あるいは水和水

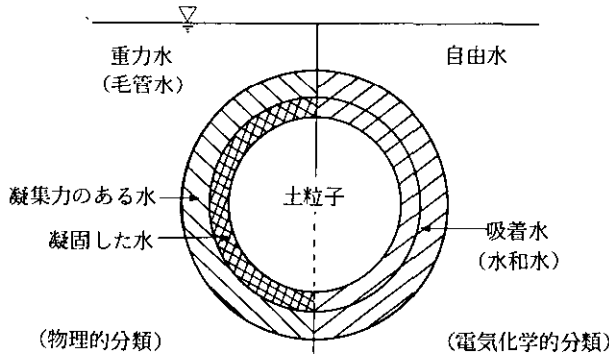


図 4-11 底泥の水分の存在形態<sup>5)</sup>

Fig. 4-11 Modes of water in mud<sup>5)</sup>

(凝固した水と凝集力のある水)に分けられる。土粒子の水和モデルを図4-11<sup>5)</sup>に示す。水の吸着は水素結合による。この結合力は表面が最も強く、水分子はある種の構造を形成している。表面から遠のくにつれて水分子の配向の減少と、結合力の低下の相乗作用で、急激に自由水に近づく。表面の吸着水は、粒子表面に対して平行な二つの方向では比較的自由に移動できるが、垂直や遠ざかる方向には移動できないような構造を形成していると考えられる。この水和層の厚さは、粘土表面の水素結合のためのO基\*の数や、水中の陽イオンの種類や濃度により大きく変化する。吸着水と自由水とでは、密度・粘性・誘電率などの諸性質が大きく異なることが知られている。

\* 粘土鉱物表面には酸素原子が露出しており、双極性由来によるδ-電荷を帯びている。そこに、双極性水分子のδ-電荷を帯びたH-基が結びついて水素結合をする。

### 4.5.2 電気拡散二重層

粘土は、同形置換や破壊原子価などにより、表面に負電荷を帯びることは述べたが、一部では、破壊原子価によって陽電荷も帯びている。しかし陽電荷量が少ないために、粘土は、表面全体としては負電荷を帯びており、それを中和するために交換性陽イオンが吸着している<sup>9)</sup>。粘土粒子が溶液と接すると、この陽イオンが一部解離して電気二重層（拡散イオン層）を形成する。土粒子の形状は、球、棒、薄片状などさまざまであるが、いま球状の土粒子を想定して、水溶液中の荷電の分布と状態を図4-12に模式的に示す。これをミセル (micell) といい、一つ一つのミセルは電氣的に中性であり、ミセルが大きいほど土粒子は分散して安定な状態にある。その理由を次に述べる。

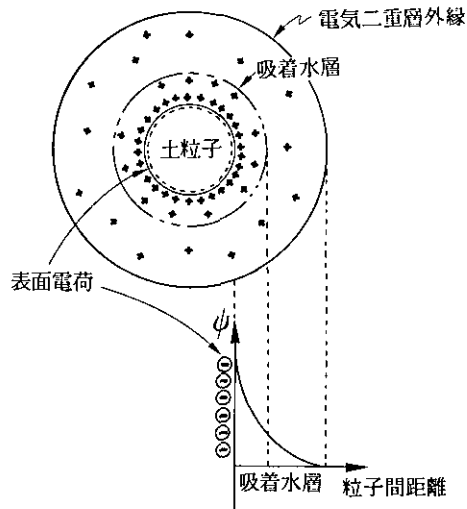


図 4-12 電気二重層の模式図

Fig. 4-12 Typical figure of electric double layer

### 4.5.3 土粒子の分散・凝集

土粒子の分散・凝集は、粒子の電気二重層の重なり合いに基づく静電的な反発力と、粒子間に普遍的に働く Van der Waals 力と呼ばれる引力の大小関係で説明される。この理論は、DLVO 理論<sup>6),7),8)</sup>と呼ばれる。電気二重層の厚さは、数 Å から数百 Å にわたる差異があるとされているが、粒子の陽イオン交換容量や陽イオン解離度が大きいと厚くなり、溶液中の電解質濃度が高いと薄くなり、電解質の種類にも左右される。一方、Van der Waals 力は、溶液の濃度やイオン種によってほとんど影響されなく、粒子がかなり接近した時初めて作用する。これらの二つの力の関係を図4-13<sup>7)</sup>に示す。図中、 $V_R$ は静電気反発エネルギー、 $V_A$ が吸引エネルギー、 $V$ が全エネ

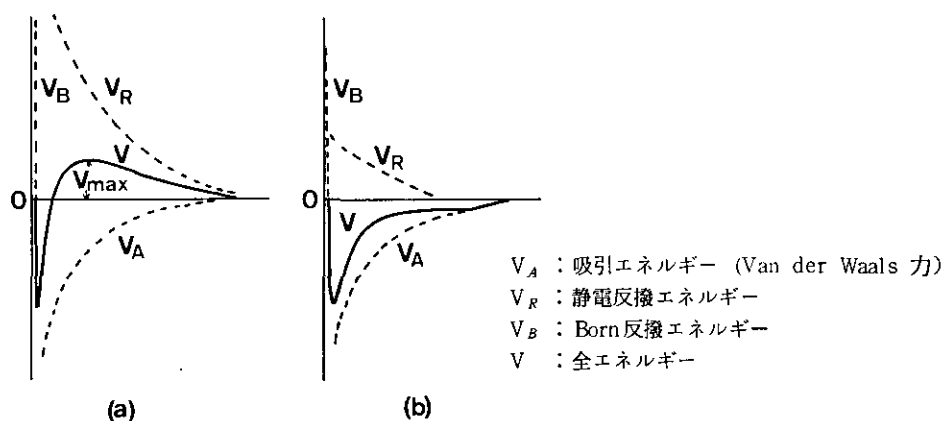


図 4-13 土粒子の反発と吸引エネルギー<sup>7)</sup>  
 Fig. 4-13 Energies of repulsion and absorption of mud particle<sup>7)</sup>

ルギーである。図 4-13(a)の場合、 $V_{max}$ が十分大きければ、ブラウン運動等により近づいてきた粒子を反発させて安定な分散状態で存在しているが、 $V_{max}$ が小さい場合、凝集は阻害されはするがいずれは凝集する。この場合が緩慢凝集と吸ばれる。図 4-13(b)の場合、常に $V < 0$ であって凝集阻害がなく、凝集速度は速く急速凝集といわれる」

土粒子の分散系は $V_{max} > 0$ が大きいほど安定であるわけだが、分散系における $V_A$ は溶易に変化しないので、結局 $V_R$ の特性によって分散、凝集が決まることになる。 $V_R$ が大きいことは電気二重層が厚いことを意味し、これがミセルが大きいほど安定である理由である。電気二重層が厚くなる条件を整理すると

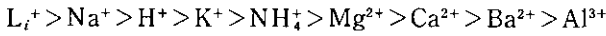
- ①粒子の陽イオン交換容量が大きい
- ②吸着陽イオンの解離度が大きい
- ③溶液中の電解質が1価の原子価の陽イオンを持ち、濃度があまり高くない
- ④溶液がアルカリ性である

ことなどである。

①の条件から、カオリナイトよりもモンモリロナイトのほうが分散しやすいことになる。④の条件は、アルカリの $\text{OH}^-$ によって粘土表面の正荷電を中和し、表面負荷電の増大をはかる。逆に酸性では、負荷電が減少し凝集しやすくなる。②、③の条件は交換性陽イオンの性質に深く関連している。このイオンにより電気二重層が形成されているが、陽イオン濃度は粘土表面で高く、表面から遠ざかるにつれて低くなり、外縁では溶液中の平均濃度と等しくなる分布をしている。①の条件が等しい粘土において、電気二重層が厚い条件は、粘土表面の残留負荷電位が高いこと、表面からの距離の増加による電位の減少率が小さいことである。そのためには、粘土表面で陽イオンが多く解離し、その陽イオンの和半径が大きく、イオン間隔が大きくなる必要がある。

一般に、置換能力の小さい陽イオンほど解離度が大きく、同一原子価では、原子番号の小さい

ものほど水和直径が大きい傾向がある<sup>5),9)</sup>。このように考えると、電気二重層を厚くする陽イオンの順位は、



となる。

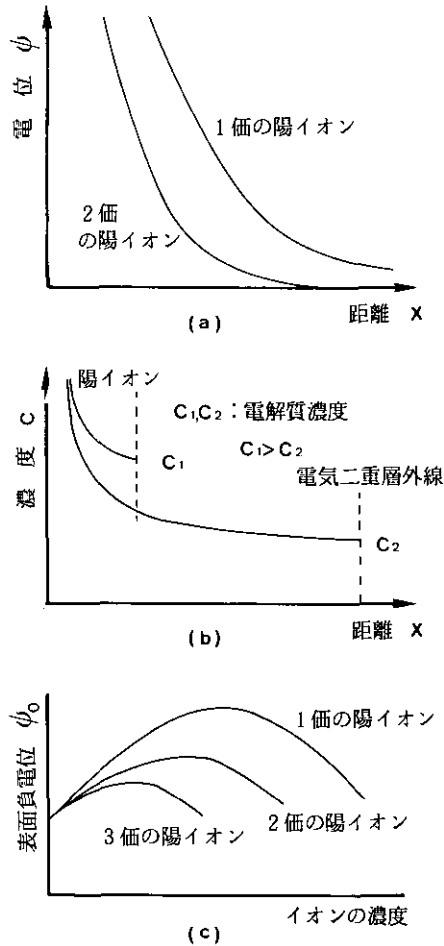


図 4-14 電気二重層の厚さに及ぼす原子価、電解質濃度の影響<sup>5),10)</sup>

Fig. 4-14 Effects of atomic value and concentration of electrolyte on the thickness of the electric double layer<sup>5),10)</sup>

溶液中の電解質の影響も大きい。吸着陽イオンが  $Na^+$  で、溶液中の電解質のそれが  $Ca^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$  のような原子価が大きく置換能力が大きいものである場合、吸着イオンの置換が起こり、その置

換量も電解質の濃度が高いほど大きく凝集しやすくなる。また、吸着陽イオンと電解質陽イオンが同じのものであっても、電解質濃度が高いと電気二重層外縁濃度が上がり、内部の濃度も高くなり、その結果電気二重層が薄くなる。これらのことを示したのが図4-14<sup>5),10)</sup>である。図4-14(a)は表面電位が同じ条件での吸着陽イオンの原子価の影響を、(b)は溶液の電解質の濃度の影響を示す。(c)は純粋粘土の水溶液に水酸化アルカリを添加した場合の表面負電位の変化を示す。濃度が薄い場合、負荷電が上昇するのは④の条件に対応し、極大値を示した後低下するのは、電解質濃度が高いため吸着陽イオンの解離が抑えられるためである。(c)では原子価の影響も示されており、原子価の大きいものほど、解離が小さいことが示されている。

#### 4.5.4 粘土の沈降形態の違いの原因

これまでの考察をもとに、カオリナイト、ベントナイト、モンモリロナイトで沈降形態が異なる理由を考える。カオリナイトとモンモリロナイトは、界面高さの値自体は異なるが、界面が現れる点では同じ形態である。ベントナイトは、沈積面とその上部の高い濃度の懸濁体が特徴で、カオリナイト、モンモリロナイトと形態が異なる。

最初に、土粒子自体の特徴から述べる<sup>5),9),11)</sup>。カオリナイトは、第2.2節で述べたように、1:1型粘土鉱物である。その層構造の特性上、シリカシート、アルミナシートの各イオンの荷電は結晶内部で完全に中和されているため、同形置換による荷電発生はなく、粒子の結晶縁辺での破壊原子価による荷電があるばかりで、荷電量は非常に少ない。また、シリカシートの $O^{-\delta}$ 基と他の粒子のアルミナシートの $OH^{-\delta}$ 基が水素結合をしていて、100枚以上の層が積み重なることがあり結合力も強い。カオリナイト一層の厚さは $7.2 \text{ \AA}$ であるが、通常は $0.01 \mu\text{m}$ 程度の厚さで存在している。モンモリロナイトは2:1型粘土鉱物であり、同形置換による荷電の発生があるため、交換性吸着陽イオン量が多い。また、粒子単位の両側がシリカシートであるため、粒子間では $O^{-\delta}$ 基が対面するので、水素結合はおろか、かえって反発し合う。そのためカオリナイトのような粒子の積み重ねは起こらない。モンモリロナイトの粒子の結合は、交換性陽イオンによるがこの結合力は弱く、結晶間に水が容易に浸入することができ、 $10.2 \text{ \AA}$ の厚さの結晶に分解する。また、モンモリロナイト表面には極性水分子の $H^{+\delta}$ 基が水素結合しているし、置換性陽イオン自体も和合しているので、モンモリロナイトは吸着水が多い。ベントナイトはモンモリロナイトの不純物といわれ、基本的組成はモンモリロナイトと同様ということになっている。それにもかかわらず、ベントナイトとモンモリロナイトでは $w_0$ が同じ条件で沈降形態に違いが現れた。これは、粘土鉱物自体の構造の特徴からくるものではない。また、各粘土のv.s.s.の値から、三者とも有機成分は無視できるので、有機物が原因でもない。各粘土のpHがカオリナイトが7で中性、ベントナイトが約9で弱アルカリ性、モンモリロナイトが約5で弱酸性となっている。今回の沈降実験では、水溶液中に電解質を加えなかったが、pHは上記のようであった。このあたりに原因究明の糸口がありそうである。

ベントナイトの主な吸着陽イオンは $Na^+$ と予想され、それが水溶液中で一部解離した $H^+$ と置

換される。その分、溶液中の  $H^+$  が減少し、相対的に  $OH^-$  が増加するため弱アルカリ性を示したと考えられる。モンモリロナイトは、別名酸性白土と呼ばれ主な吸着陽イオンは  $H^+$  と考えられる。 $H^+$  が粘土表面から解離した分、弱酸性を示した。

各粘土の吸着陽イオンの種類と量は、次の方法で推測される。粘土を1規定酢酸で酸処理し、吸着陽イオンを全て解離させ、その酢酸中の金属元素の量を測定することにより、吸着陽イオンの量を推定する。溶液中の金属元素の測定は、プラズマ発光分光分析装置による。定量可能な元素は、B, Na, Mg, Al, Ca, Mn, Fe,  $N^+$  である。各粘土の吸着陽イオン量を反映する金属元素量 ( $10 \times me/kg$ ,  $me$ : ミリグラム当量) を、表4-5に示す。表4-5には、従来から知られている陽イオン交換容量 CEC ( $10 \times me/kg$ ) を参考のため付記した<sup>10)</sup>。

表 4-5 ICP による粘土中の金属元素同定量  
Table 4-5 Quantities of mineral elements in clays obtained by ICP

Mud	B	Na	Mg	Al	Ca	Mn	Fe	$N^+$	CEC
Kaolinite	0.003	0.001	0.02	0.12	0.18	0.002	0.02	0.03	3~15
	0.03	0.004	0.17	1.33	0.9	0.01	0.11	0.07	
Bentonite	0.008	158.4	0.56	0.17	1.69	0.06	0.89	1.07	100~150
	0.08	68.9	4.76	1.88	8.45	0.3	4.9	2.49	
Montmorillonite	0.002	0.015	0.28	0.03	1.87	0.002	0.02	0.1	100~150
	0.02	0.075	2.33	0.33	3.77	0.01	0.11	0.25	
$Na^+$ -Kaolinite	0.003	0.336	0.005	0.078	0.016	0.001	0.04	0.02	
	0.03	1.344	0.04	0.86	0.08	0.005	0.22	0.05	
$Ca^{2+}$ -Bentonite	0.009	0.80	11.31	0.47	27.8	0.16	3.35	0.63	
	0.09	3.18	10.9	5.19	139	0.8	18.4	1.58	
$Na^+$ -Montmorillonite	0.003	3.89	0.025	0.02	0.08	0.0007	0.004	0.10	
	0.03	16.9	0.20	0.22	0.04	0.007	0.02	0.25	

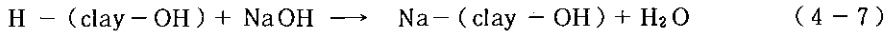
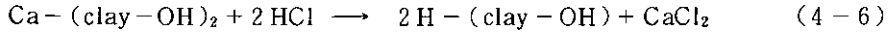
カオリナイトは、吸着陽イオン量が少なく、 $Al^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  が主要な陽イオンであること、ベントナイトは陽イオンの定量の総和が  $915 me/kg$  であり、そのうち 75% が  $Na^+$  である。モンモリロナイトは、定量の総和が  $69 me/kg$  であり、CEC を  $1000 me/kg$  とすると  $H^+$  が 90% 近くを占めていると考えられる。

以上のことから、カオリナイトとモンモリロナイトが界面沈降を行ったのは、吸着陽イオンが、凝集作用の強い  $H^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  であるためであり、ベントナイトの微細粒子が安定な状態で分散したのは、吸着陽イオンが  $Na^+$  であったためと考えられる。

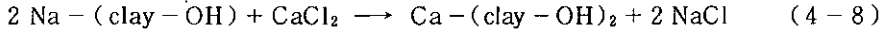
カオリナイトとモンモリロナイトの  $H_{\infty}/H_0$  に大きな差が現れたのは、吸着陽イオンが原因ではなく、粘土鉱物の構造の違いによる CEC や吸着水層の厚さの違いが主な原因であろう。

#### 4.5.5 粘土の吸着陽イオンの置換による沈降形態の変化

吸着陽イオンの影響を確認するために、粘土の吸着陽イオンを置換し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吸着陽イオンを  $\text{Na}^+$  に置換し、ベントナイトは  $\text{Ca}^{2+}$  に置換して、同一初期含水比で沈降実験を行った。 $\text{Na}^+$  は置換能力が低いので、塩酸（1 規定）で  $\text{H}^+$  に置定し、よく洗浄後  $\text{NaOH}$ （1 規定）を加えて  $\text{Na}^+$  に置換する。これを反応式で示すと



となる。 $\text{Ca}^{2+}$  は置換能力が大きいので



の反応式で置換が進む。

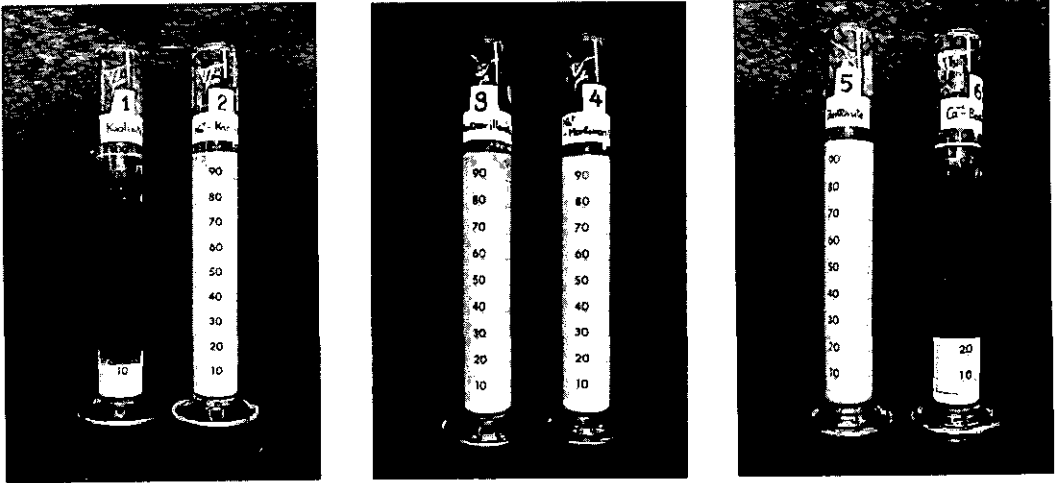


写真 4-2 吸着陽イオンによる粘土の沈降形態の変化

Photo 4-2 Settling mode change with the exchange of adsorbed cation on clay surface

置換操作後の粘土ペーストから抽出した金属元素量を表 4-5 に示す。 $\text{Na}^+$ -Kaolinite は  $\text{Na}^+$  が置換前の 340 倍近い値である。 $\text{Ca}^{2+}$ -Bentonite では  $\text{Na}^+$  が 20 分の 1 に  $\text{Ca}^{2+}$  が 16 倍程度となった。ただし、 $\text{Ca}^{2+}$  は、一部電解質として存在していると考えられる。 $\text{Na}^+$ -Montmollironite



では  $\text{Na}^+$  は 225 倍に増加しているが、 $\text{H}^+$  を全ては置換できていないと思われる。

写真 4-2 の一連の写真は、各粘土の沈降形態が、陽イオンにより変化することを示している。(a) はカオリナイト  $w_0=2000\%$ 、(b) はモンモリロナイト  $w_0=4000\%$ 、(c) はベントナイト  $w_0=2000\%$  である。

置換前のカオリナイトでは、メスシリンダーの 13 ml の目盛付近に界面が、 $\text{Na}^+$ -カオリナイトでは 5 ml の目盛に沈積面が、上部に微細粒子の分散系が存在する。モンモリロナイトにおいても、置換前には 78 ml の目盛付近に界面が、 $\text{Na}^+$  置換後には 5 ml の目盛付近に沈積面と上部に懸濁液が認められる。一方、ベントナイトでは置換前には 9 ml の目盛付近に沈積面とその上部に懸濁液が、 $\text{Ca}^{2+}$  に置換後には 25 ml の目盛付近に界面が認められる。

以上のことから、吸着陽イオンの種類が沈降形態を変化させうる事が確認でき、吸着陽イオンが重要な支配因子であることが明らかとなった。純度に違いはあるものの、主成分粘土鉱物が同一であるモンモリロナイトとベントナイトの沈降形態に違いが現れたのは、吸着陽イオンの違いに原因があると結論される。

#### 4.5.6 水溶液の pH と保護コロイド

腐植を一部除去した Kasumi Mud 6 の沈降形態も吸着陽イオンによって説明できる。腐植除去のため、1 規定 NaOH による加熱処理がなされたが、その際  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  が一部  $\text{Na}^+$  に置換されたと考えられる。そのため、ベントナイトと同様な沈降形態となった。ちなみに、この底泥懸濁液に 1 規定 HCl を加え、 $\text{pH} < 6$  にすると凝集が起こり界面沈降を呈した。

この節の最後として、デンプン、寒天の含有の影響について述べる。デンプンは可溶性のため、粘土分散系において保護コロイドとして作用し粘土の凝集を抑制する<sup>5)</sup>。そのために、微細粒子の安定な分散と大型粒子の自由沈降が起こる。寒天の場合、常温でゾル化せず立体的構造を形成し、その内部に水分子や粘土粒子を取り込んでいる。高濃度の場合はその立体的構造が互いに絡み合って全体的な系を作り界面沈降をするが、低濃度の場合、数  $10 \mu\text{m}$  の大型粒子はすみやかに自由沈降し、微細粒子は微細な寒天粒子による緩衝作用のため凝集が防げられ分散状態で存在すると考えられる。

### 第 4.6 節 沈降特性に関する理論的考察

#### 4.6.1 沈降曲線

底泥の初期濃度がある程度濃厚となり凝集状態にあるときは、いわゆる集合沈降をなし明瞭な界面を生ずることは従来からも言及されており、今回の沈降実験でも認められた。界面の高さと時間の関係を示す曲線をその底泥の沈降曲線 (settling curve) という。沈降曲線は底泥の種類、凝集状態などに応じて種々の形態をとるが、普通図 4-15 に示すようである。最初のある時間までは、定速沈降区間 (constant settling-rate period) が存在し、この時間を過ぎると減速沈降区間

では  $\text{Na}^+$  は 225 倍に増加しているが、 $\text{H}^+$  を全ては置換できていないと思われる。

写真 4-2 の一連の写真は、各粘土の沈降形態が、陽イオンにより変化することを示している。(a) はカオリナイト  $w_0 = 2000\%$ 、(b) はモンモリロナイト  $w_0 = 4000\%$ 、(c) はベントナイト  $w_0 = 2000\%$  である。

置換前のカオリナイトでは、メスシリンダーの 13 ml の目盛付近に界面が、 $\text{Na}^+$ -カオリナイトでは 5 ml の目盛に沈積面が、上部に微細粒子の分散系が存在する。モンモリロナイトにおいても、置換前には 78 ml の目盛付近に界面が、 $\text{Na}^+$  置換後には 5 ml の目盛付近に沈積面と上部に懸濁液が認められる。一方、ベントナイトでは置換前には 9 ml の目盛付近に沈積面とその上部に懸濁液が、 $\text{Ca}^{2+}$  に置換後には 25 ml の目盛付近に界面が認められる。

以上のことから、吸着陽イオンの種類が沈降形態を変化させうる事が確認でき、吸着陽イオンが重要な支配因子であることが明らかとなった。純度に違いはあるものの、主成分粘土鉱物が同一であるモンモリロナイトとベントナイトの沈降形態に違いが現れたのは、吸着陽イオンの違いに原因があると結論される。

#### 4.5.6 水溶液の pH と保護コロイド

腐植を一部除去した Kasumi Mud 6 の沈降形態も吸着陽イオンによって説明できる。腐植除去のため、1 規定 NaOH による加熱処理がなされたが、その際  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  が一部  $\text{Na}^+$  に置換されたと考えられる。そのため、ベントナイトと同様な沈降形態となった。ちなみに、この底泥懸濁液に 1 規定 HCl を加え、 $\text{pH} < 6$  にすると凝集が起こり界面沈降を呈した。

この節の最後として、デンプン、寒天の含有の影響について述べる。デンプンは可溶性のため、粘土分散系において保護コロイドとして作用し粘土の凝集を抑制する<sup>5)</sup>。そのために、微細粒子の安定な分散と大型粒子の自由沈降が起こる。寒天の場合、常温でゾル化せず立体的構造を形成し、その内部に水分子や粘土粒子を取り込んでいる。高濃度の場合はその立体的構造が互いに絡み合って全体的な系を作り界面沈降をするが、低濃度の場合、数  $10 \mu\text{m}$  の大型粒子はすみやかに自由沈降し、微細粒子は微細な寒天粒子による緩衝作用のため凝集が防げられ分散状態で存在すると考えられる。

### 第 4.6 節 沈降特性に関する理論的考察

#### 4.6.1 沈降曲線

底泥の初期濃度がある程度濃厚となり凝集状態にあるときは、いわゆる集合沈降をなし明瞭な界面を生ずることは従来からも言及されており、今回の沈降実験でも認められた。界面の高さと時間の関係を示す曲線をその底泥の沈降曲線 (settling curve) という。沈降曲線は底泥の種類、凝集状態などに応じて種々の形態をとるが、普通図 4-15 に示すようである。最初のある時間までは、定速沈降区間 (constant settling-rate period) が存在し、この時間を過ぎると減速沈降区間

(decreasing settling-rate period)に入り、界面直下の底泥濃度が初期値より大きくなり、界面沈降速度は徐々に減少してゆく。この区間は圧縮脱水区間 (compression period) とよばれることもある。定速沈降区間と減速沈降区間の境界を圧縮点というが、この圧縮点は明確でないこともある。減速沈降区間は、全体の底泥が相互に接触し自重を伝達し系全体が圧密過程にあるという考え方と、堆積濃縮されても最終状態まではゾルの状態にあり、土粒子は液中に浮遊し自重を伝達していないという考え方がある。通常は堆積濃縮が少ないうちはゾルの状態であり、ある程度濃縮が進むにつれてゲル化して自重を伝達するものと考えられる。その意味で、減速沈降区間の前半を遷移区間と呼ぶ場合もあるが、それと圧密区間の境界の判定は非常に難しい。

従来から、沈降曲線の形状を表現するいろいろの実験、経験式や理論式が提案されているが、その主なものを紹介する<sup>12),13),14)</sup>。

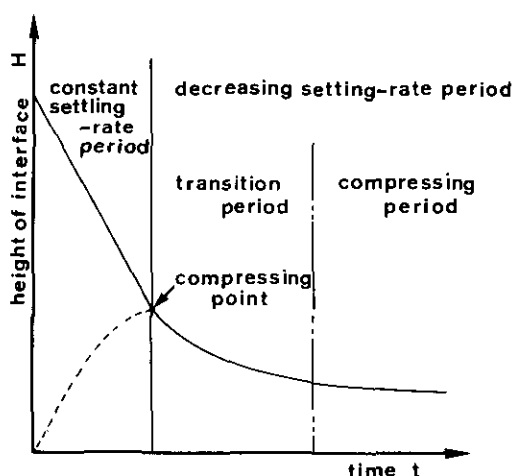


図 4-15 沈降曲線の領域区分。

Fig. 4-15 Classification of settling curve

(i) Work-Kohler の関係

これは初濃度  $C_0$  が同一で初高  $H_0$  の異なるスラリの沈降曲線が、減速のある区間までは相互に相似関係にあるという経験式である。

$$\frac{H}{H_0} = f\left(\frac{t}{H_0}\right) \quad (4-9)$$

ここに、 $t$  : 沈降時間、 $H$  :  $t$  時間後の界面高さである。経験的に圧密沈降区間に入らない沈降現象に対して、式(4-9)がよく成立すると言われる。この関係式は、初高  $H_0$  の異なる沈降曲線は推測できるが、初期濃度が異なる場合は推測できない。図 4-16 は、今回の沈降実験で得られた

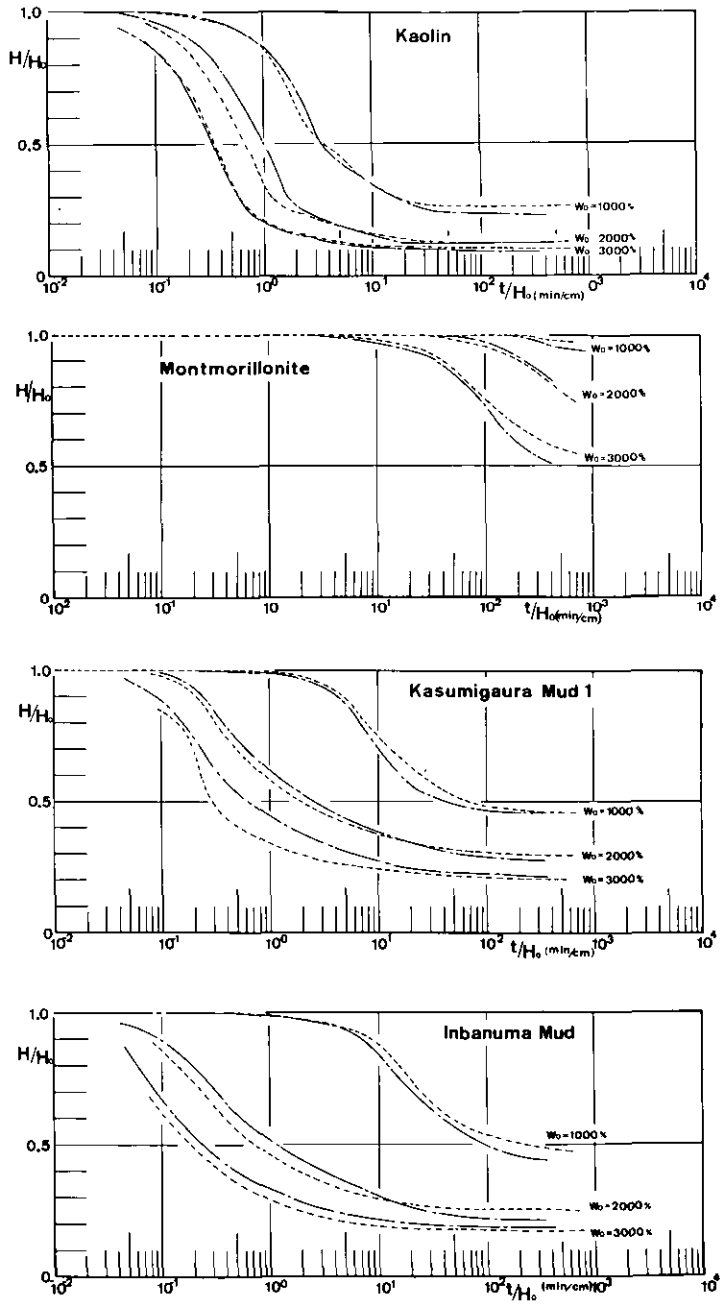
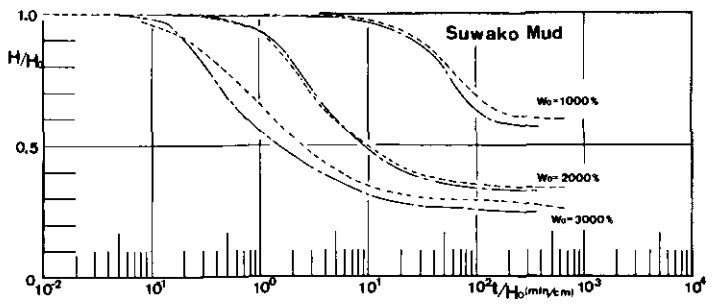
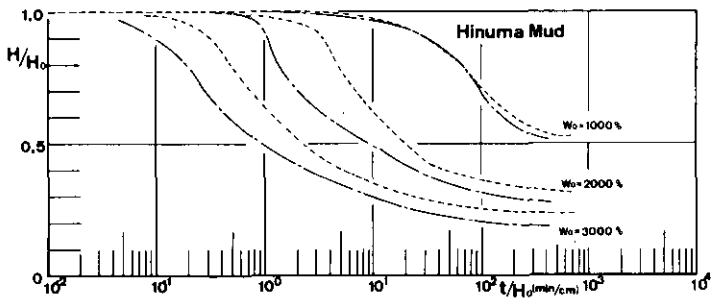
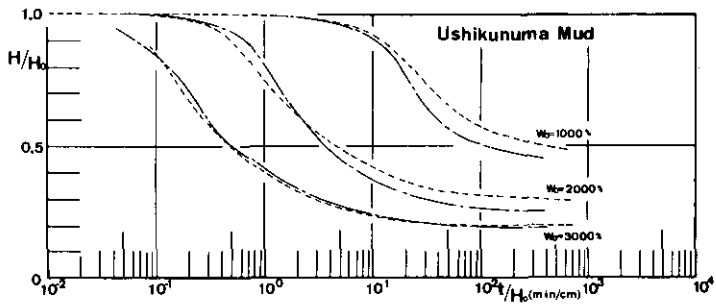
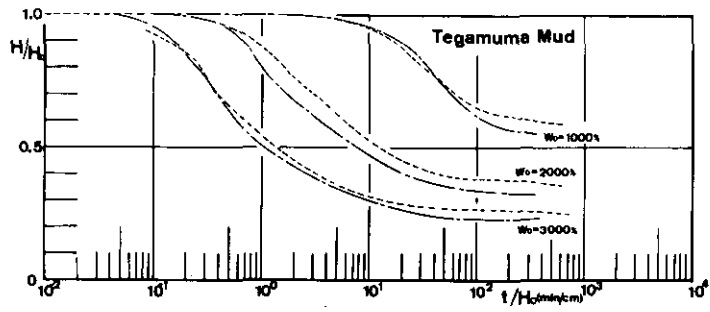


図 4-16 底泥の沈降曲線 (Work-Kohlerの方法による整理)  
 Fig. 4-16 Settling curves of muds (adjusted by the method of Work-Kohler)



☒ 4-16 (つづき)

Fig. 4-16 (Continued)

沈降曲線を式(4-9)によって整理したものである。式(4-9)を満足していないものがあるが、全般的には最終状態を除いて式(4-9)の関係式が成立していると思われる、後に述べるが、Work-Kohlerの関係はKynchの理論で説明できるものであるので、図4-16の結果は、沈降区間のある区間までは、Kynchの理論が成立することを示している。

(ii) Robertsの関係式

圧密脱水区間での沈降曲線を示す実験式であって、圧縮点における界面高さを $H_c$ 、その時の時間を $t_c$ とすると、時刻 $t$  ( $t > t_c$ )における界面高さはつぎのように表わされる。

$$\frac{H - H_\infty}{H_0 - H_\infty} = \exp \{-k_H(t - t_c)\} \quad (4-10)$$

ここで、 $H_\infty$ ：最終状態の界面高さ、 $k_H$ ：懸濁液の性質によって決まる実験的な定数である。

(iii) その他 Robimson の式、Rollason の式などがある。これらも、沈降曲線の形状を近似する実験式である。

(i), (ii), (iii) はいずれも沈降現象そのものに対する考察が不十分と思われる。

#### 4.6.2 Kynchの理論<sup>15)</sup>

Kynchは均質スラリのある層の沈降速度(固定した座標に対する速度)は、その部分の局所濃度のみの関数であると仮定し、その仮定に基づき物質収支のみから、沈降曲線および沈降層中の濃度の分布についての重要な結論を得た。

いま、沈降中のスラリの任意の水平断面の濃度を $C$ 、その沈降速度 $R$ (上向きを正)、 $R$ は $C$ のみの関数とする。図4-17のように座標をとり、連続式をたてると次式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial h} = 0 \quad (4-11)$$

ここに、 $S = CR$ で単位時間に沈降する固体質量である。 $R$ は $C$ のみの関数であるから、

$$\frac{\partial S}{\partial h} = \frac{\partial C}{\partial h} \frac{\partial S}{\partial C} = \frac{\partial C}{\partial h} \left( C \frac{\partial R}{\partial C} + R \right) \quad (4-12)$$

となる。いま、

$$U = C \frac{\partial R}{\partial C} + R \quad (4-13)$$

とすると、式(4-11)は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial h} = 0 \quad (4-14)$$

と書き改められる。

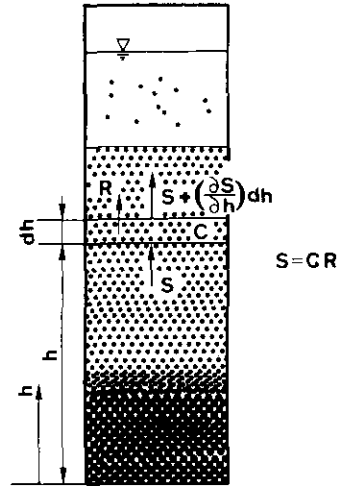


図 4-17 沈降現象における物質収支  
Fig. 4-17 Mass balance in settling phenomenon

一方、沈降過程中的スラリの同一濃度の点をむすぶ線の方程式を考える。等濃度線上によって次式が成立する。

$$dC = \frac{\partial C}{\partial h} dh + \frac{\partial C}{\partial t} dt = 0 \quad (4-15)$$

式(4-14)、式(4-15)より等濃度線の勾配は

$$\left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_{C = \text{const}} = U \quad (4-16)$$

で与えられる。式(4-16)は、濃度 $C$ の層は $U = \partial S / \partial C$ の様な速度で伝播上昇して行くことを意味する。

Kynchは $C-U$ 曲線の特性和初期濃度 $C_0$ の値によって沈降曲線の特徴が異なることを理論的に示した。いま、一例として $C$ の増加とともに $U$ が減少するような濃度範囲の、スラリの沈降曲線を考える。この場合、 $h$ 軸上の諸点より発する等濃度線はいずれも

$$h = h_0 + U_0 t \quad (4-17)$$

で表わされる。ここに  $h_0$  は  $t=0$  なるときの任意の高さ、 $U_0$  は  $C_0$  に対応する上昇速度である。つぎに下底にごく接近して存在した固相は値ちに底面に達して堆積濃縮を始めるから、原点 0 ( $h=0, t=0$ ) の近くでは、濃度は連続的ではあるが急速に  $C_0$  から最終濃度  $C_\infty$  まで増大する。これらの  $C_0 \sim C_\infty$  の各濃度層の等濃度線は

$$h = Ut \quad (\text{for } C_0 \leq C \leq C_\infty) \quad (4-18)$$

となる。(図 4-18)

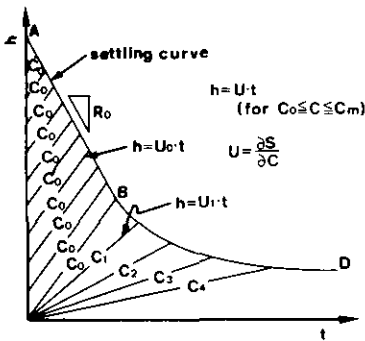


図 4-18 等濃度線  
Fig. 4-18 Same mud density lines

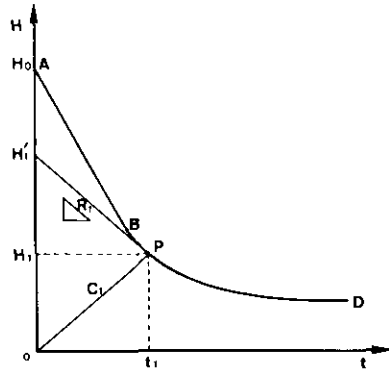


図 4-19 Kynch の解析法  
Fig. 4-19 Analytical method introduced by Kynch

また、これらの等濃度線の終端すなわち、 $h \sim t$  図上での等濃度線と沈降曲線の交点（沈降界面の高さ）はつぎの関係より求められる。図 4-18 の沈降曲線 A,B,D において、AB 間は定速沈降区間で、沈降曲線は A 点 ( $t=0, h=H_0$ ) を通り  $R_0$  ( $R_0: C_0$  に対する沈降速度) の傾斜を持つて直線となる。BD 間では、任意の濃度  $C_1$  ( $C_0 \leq C_1 \leq C_\infty$ ) が高さ 0 から界面まで  $U_1$  なる速度で伝播上昇する  $t_1$  時間内に、単位面積当りの固相線量  $C_0 H_0$  がこの層を通過しているので、つぎの関係式が成立する。

$$C_0 H_0 = C_1 (U_1 - R_1) t_1 \quad (4-19)$$

このときの界面高さを  $H_1$  とすると

$$U_1 = \frac{H_1}{t} \quad (4-20)$$



であり、式(4-20)を式(4-19)に代入して整理すると、

$$C_1 = \frac{C_0 H_0}{H_1 - R_1 t_1} \quad (4-21)$$

となる。いま、図4-19に示すように、時刻 $t_1$ における沈降曲線上の点をPとし、P点における沈降曲線に対する接線と $h$ 軸上との交点の座標を $H_1'$ とすると、この接線の傾きは濃度 $C_1$ 層の沈降速度に等しいから、

$$\left( \frac{dh}{dt} \right)_P = R_1 \quad (4-22)$$

である。ゆえに、

$$H_1' = H_1 - R_1 t_1 \quad (4-23)$$

となり、

$$C_1 = \frac{C_0 H_0}{H_1'} \quad (4-24)$$

が導かれる。

任意の時刻 $t_1$ における沈降曲線の接線を引き $h$ 軸との交点の座標 $H_1'$ を求めれば、式(4-24)から、その時の濃度 $C_1$ が得られ、接線の傾斜角から $C_1$ に対する沈降速度が求めることができる。

一般に、スラリの $C-S$ 曲線は図4-20(a)のようであり、変曲点 $P_e$ があり、かつ最終濃度 $C_\infty$ の点において $\partial S / \partial C \neq 0$ である。この場合には、 $C_0$ の大小によって、図4-20(c)のように沈降曲線に三つの型が現れる<sup>14)</sup>。図中、 $C_e$ は(a)図の変曲点 $P_e$ での濃度、 $C_1$ は(a)図において $C_\infty$ 点における $C-S$ 曲線の接線と $C-S$ 曲線との交点の濃度である。

Kynchの理論によれば、スラリーが同一のものである場合、任意の条件で実験を行なって沈降曲線を求めて、その曲線から、 $S-C$ 曲線および $U-C$ 曲線を求めることによって、他の任意の $C_0$ 、 $H_0$ の条件の沈降曲線を推測できる。例えば、いま $S-C$ および $U-C$ の関係が図4-20のように求められたとする。知りたい沈降曲線の初期濃度を $C_{0u}$ 、初期高さを $H_{0u}$ とし、 $C_{0u} > C_e$ とする。この場合、沈降曲線は、時刻 $t_B$ までは $H_{0u}$ を切片とし、傾き $R_{0u}$ ( $R_{0u} : C_{0u}$ に対応する沈降速度)の直線となる。時刻 $t_B$ は、

$$t_B = \frac{H_{0u}}{U_{0u} - R_{0u}} \quad (4-25)$$

で与えられる。

時刻 $t_B$ 以後の沈降曲線については次のようにして求めることができる。界面の濃度が $C_2$  (>

$C_0$ ) となる時間  $t_2$  は式 (4-19) から

$$t_2 = \frac{C_{0u}H_{0u}}{C_2(U_2 - R_2)} \quad (4-26)$$

で与えられ, その時の界面高さ  $H_2$  は

$$H_2 = C_2 t_2 \quad (4-27)$$

で与えられる。式 (4-25) ~ 式 (4-27) における  $U_{0u}$ ,  $R_{0u}$ ,  $C_2$ ,  $U_2$ ,  $R_2$  の値は図 4-20 から読み取ればよい。

次に Work-Kohler の関係が, Kynch の理論によって説明できることを示そう。Work-Kohler の関係は初期濃度  $C_0$  が一定という条件で

$$\frac{H}{H_0} = f\left(\frac{t}{H_0}\right) \quad (4-9)$$

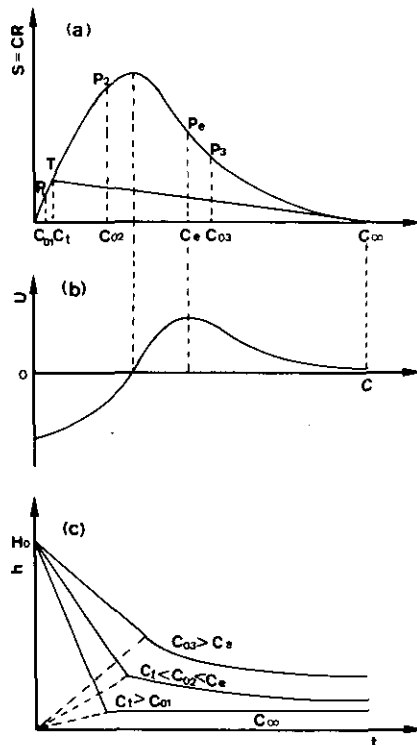


図 4-20  $S$ ,  $U-C$  の曲線及び  $C_0$  による沈降曲線の違い(模式図)<sup>14)</sup>  
 Fig. 4-20 Curves of  $S$ ,  $U-C$ , and the difference of the settling curves caused by initial mud density<sup>14)</sup>

が成立するというものであった。いま  $C_0$  が一定で初期高さ  $H_{01}$ ,  $H_{02}$  ( $H_{01} \neq H_{02}$ ) の沈降曲線を考える。簡単のため  $C_0$  ( $> C_e$ ) とする。圧縮点の時刻を  $t_c$  とすると、 $t_c$  は式 (4-25) で与えられる。 $C_0$  が一定であれば、

$$\frac{t_{ci}}{H_{0i}} = \frac{H_{0i}}{U_0 - R_0} \cdot \frac{1}{H_{0i}} = \frac{1}{U_0 - R_0} = \text{const.} \quad (i = 1, 2) \quad (4-28)$$

となる。一方、その時刻の界面高さ  $H_c$  についても、

$$\frac{H_{ci}}{H_{0i}} = \frac{U_0 t_{ci}}{H_{0i}} = \frac{U_0}{U_0 - R_0} = \text{const.} \quad (i = 1, 2) \quad (4-29)$$

の関係がある。また減少沈降区間においても、任意の濃度  $C_3$  ( $> C_e$ ) となる時刻  $t_3$  と界面高さ  $H_3$  に対して、それぞれ

$$\frac{t_{3i}}{H_{0i}} = \frac{C_0}{C_3(U_3 + R_3)} = \text{const.} \quad (i = 1, 2) \quad (4-30)$$

$$\frac{H_{3i}}{H_{0i}} = U_3 \frac{t_{3i}}{H_{0i}} = \frac{C_0 U_3}{C_3(U_3 + R_3)} = \text{const.} \quad (i = 1, 2) \quad (4-31)$$

が成立する。すなわち、等速・減速の両沈降区間を通じて Work-Kohler の関係式、式 (4-9)

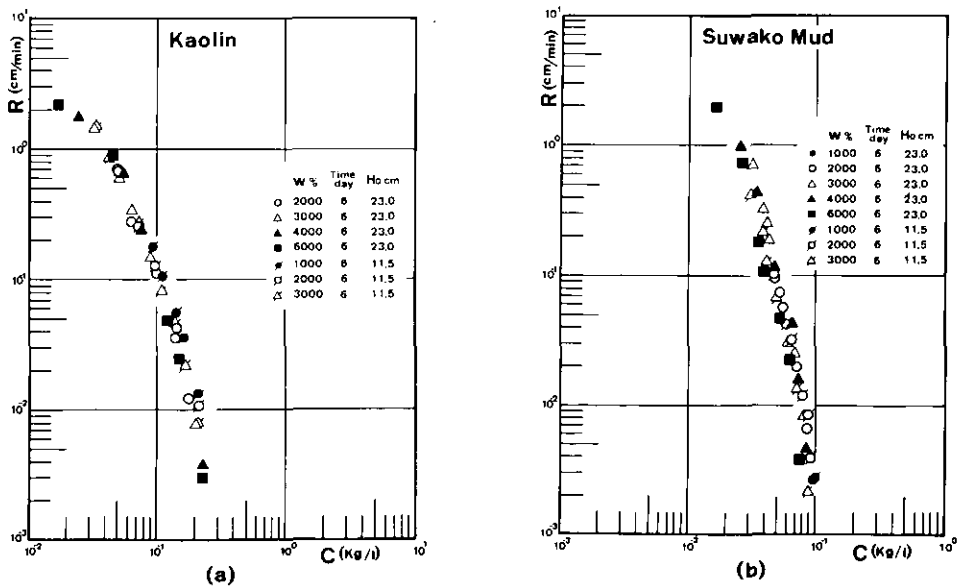


図 4-21 底泥濃度と沈降速度の関係

Fig. 4-21 Relationships between the mud density and settling velocity

の成立が示された。

Kynchの理論は、 $R$ が $C$ のみの関数であるとの仮定のもとに、各種スラリーの沈降特性をよく説明していれといわれる<sup>24)</sup>。

図4-21は $C-R$ の関係を示す。(a)はカオリナイト、(b)は諏訪湖泥の場合である。Kynchの仮定したように $C-R$ にはほぼ一定の関係があるが、その関係は底泥の種類により異なり、実験的にしか求められない。さらに、この理論では、沈降槽下底に推積濃縮された状態にある泥状物が、最終濃度 $C_0$ に至るまでゾルの状態にあり、粒子は液中に浮遊していることを前提としている。そのため自重伝達による圧密沈降区間には適用し得ない。実際この理論によれば最終濃度 $C_0$ が界面に現れた場合、堆積層の濃度は一様に $C_0$ となり実際現象に合わない。Kynchの理論は、等速沈降区間と圧密沈降区間を除く減速沈降区間の沈降曲線に適用範囲が絞られる。

#### 4.6.3 圧密沈降に関する理論

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、自重による圧密であること、全層厚に比して圧密量が大きいことである。圧密の理論的研究では、Terzaghiの圧密方程式が有名であるが、自重圧密や沈下量が大ききときには、初期条件や境界条件の設定が難しくなる。特に圧密量が大ききときは、固相の各elementの鉛直座標が変化するので、Terzaghiの理論のもとになる仮定が成立しない。このことについては、三笠<sup>16)</sup>が詳しく論じている。三笠はTerzaghiが間げき水圧についての拡散型方程式を導いたのに対して、ひずみについての拡散型方程式を導いた。そして、圧密沈下量が大きき場合、粘土の各elementの座標が圧密によって変化しないような原始座標と、圧密比という概念を導入して、ひずみに関する方程式に書き直した。即ち、時刻 $t$ の圧密の状態を、原始座標での各elementのひずみの程度で表したことになる。圧密沈下量は、原始座標でのひずみの総和ということになる。

一般の圧密沈降の理論では、村田<sup>17)</sup>がまとめているように、過剰間げき水圧、間げき水圧もしくは有効応力に関する拡散型の方程式を導いているものがほとんどである。ただ、圧密量が大ききのでLagrange座標による記述を用いている<sup>18),24)</sup>。圧密理論においては、必ず応力-ひずみの関係が何らかの形で必要となる。この関係は、各elementの変位、変形を意味するもので、これらが微少の場合は問題ないが、大きくなると各elementの移動が無視できなくなり、境界条件が圧密の進行とともに変化する。そのため、Euler座標による記述においては、質量保存を満足させるように境界条件を設定する必要がある。しかし、Lagrange座標を用いれば、その必要がなく、境界条件は排水条件だけで決まり、非常に簡便になるので、解を求めるのもEuler記述より簡単である。しかし、得られた解は、そのままでは圧密層の実際の空間分布を表わしていないので、実際現象との対応がわかりにくい。一方、Euler記述によれば、圧密期の界面を決める境界条件自体が質量保存式から求められる未知項であるため、一般に解法が面倒となる。しかし、得られる解はそのまま実現象と対応している。

圧縮沈降現象に対して、固液二相流の立場から、固相、液相ごとの運動方程式、連続方程式

から出発し、最終的に圧密現象を記述する拡散型微分方程式を誘導し解析する研究が Kos *et al.*<sup>19)</sup>、栗谷ら<sup>20)</sup>、松岡ら<sup>21)</sup>によってなされた。これらの研究は、基本変数や座標の取り方の違い、式の誘導方法や座解析方法に若干の違いはあるものの本質的には同一のものである。

#### 4.6.4 沈降現象の支配方程式

固相、液相の支配方程式は次の通りである。

連続式：

$$\text{固相} \quad \frac{\partial(1-n)}{\partial t} + \frac{\partial\{(1-n)u_s\}}{\partial z} = 0 \quad (4-32)$$

$$\text{液相} \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nu}{\partial z} = 0 \quad (4-33)$$

運動方程式：

$$\begin{aligned} \text{固相} \quad \sigma(1-n) \left( \frac{\partial u_s}{\partial t} + \frac{\partial u_s^2}{\partial z} \right) = & -(1-n) \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial p_{so}}{\partial z} + \\ & + F(n)(u-u_s) - (1-n)\sigma g \end{aligned} \quad (4-34)$$

$$\text{液相} \quad \rho n \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial z} \right) = -n \frac{\partial p}{\partial z} - F(n)(u-u_s) - n\rho g \quad (4-35)$$

ここで、 $z$  は鉛直固定座標で上向きが正、 $n$  は底泥の空隙率でこの場合空けきは全て水で飽和されている。 $u_s$  は固相の移動速度、 $u$  は液相の移動速度、 $\sigma$  は固相の真密度、 $\rho$  は水の密度、 $p$  は液相の圧力、 $p_{so}$  は固相の圧力である。 $F(n)$  は固相と液種の相対速度に比例して作用する定数で、一種の抵抗係数である。 $g$  は重力の加速度である。

これらの式の誘導にさいしては、次の仮定がなされている。

- (a) 底泥の性状は均一である。底泥の性質が時間、空間的に変化しない。
- (b) 底泥の固体成分および水の圧縮量は無視できる。

Kos *et al.*<sup>19)</sup> や栗谷ら<sup>20)</sup>は、式(4-32)～式(4-35)を Lagrange 座標に変換して、圧密方程式を導いている。栗谷らは、その方程式に基づいて数値解析を行い沈降曲線を求めている。また、等濃度線も計算し、圧密沈降区間では、Kynch の理論とは異なる曲線になることを示した。松岡らは、固定座標のまま、 $C = (1-n)\sigma$  ( $C$  : 底泥の重量濃度)に関する方程式を誘導し、定速沈降区間から圧密沈降区間にわたって沈降現象の数値解析を行った。

沈降現象においては、現象の進行が非常にゆっくりしているため、式(4-34)、式(4-35)の加速度項は無視できる。

$$\text{固相} \quad (1-n) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial p_{s0}}{\partial z} - F(n)(u-u_s) + (1-n)\sigma g = 0 \quad (4-36)$$

$$\text{液相} \quad n \frac{\partial p}{\partial z} + F(n)(u-u_s) + n\rho g = 0 \quad (4-37)$$

自由沈降や定速沈降区間では

$$p_{s0} = 0 \quad (4-38)$$

が成立する。式(4-36), 式(4-27)より

$$u - u_s = \frac{n(1-n)}{F(n)} (\sigma - \rho) g \quad (4-39)$$

となる。一方, 沈降槽内の沈降現象においては,

$$(1-n)u_s + nu = 0 \quad (4-40)$$

が成立するので,

$$u_s = n^2(n-1)(\sigma - \rho)g / F(n) \quad (4-41)$$

となる。単一球粒子の Stokes の方式

$$u_f = \frac{1}{18} \left( \frac{\sigma - \rho}{\rho} \right) \frac{g}{D} d^2 \quad (4-42)$$

と比較すると,  $n^2(n-1)/F(n)$  は, 粒子濃度の影響を加味した抵抗に関する項と考えられる。また, 底泥が堆積濃縮した場合の  $F(n)$  については, 次のように考えられる。式(4-27)は

$$F(n) = - \frac{n}{u - u_s} \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (4-43)$$

と変形される。一方, Darcy 則によれば,

$$n(u - u_s) = -K(n) \frac{\partial h_w}{\partial z} \quad (4-44)$$

である。ここに,  $K(n)$ : 空げき率  $n$  なる底泥の透水係数,  $h_w$  は全水頭である。 $\partial h_w / \partial z$  は

$$\frac{\partial h_w}{\partial z} = \frac{1}{\rho g} \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (4-45)$$

なる関係があるので、結局

$$F(n) = \frac{n^2 \rho g}{K(n)} \quad (4-46)$$

なる関係が得られ、 $F(n)$  は  $K(n)$  と関係づけられる。

圧密沈降区間においては、 $\partial p_{so}/\partial z$  の項が無視できない。この区間の支配方程式は次のように導かれる。式(4-36)より、

$$u - u_s = - \frac{1}{F(n)} \left\{ (1-n) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial p_{so}}{\partial z} + (1-n) \sigma g \right\} \quad (4-47)$$

また、式(4-37)より

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \frac{F(n)}{n} (u - u_s) - \rho g \quad (4-48)$$

式(4-48)を式(4-47)に代入し整理すると、

$$u - u_s = \frac{n}{F(n)} \left\{ \frac{\partial p_{so}}{\partial z} + (1-n)(\sigma - \rho)g \right\} \quad (4-49)$$

となり、式(4-40)の関係から

$$u_s = - \frac{n^2}{F(n)} \left\{ \frac{\partial p_{so}}{\partial z} + (1-n)(\sigma - \rho)g \right\} \quad (4-50)$$

が得られる。式(4-50)を式(4-32)に代入し、

$$C = (1-n)\sigma \quad (4-51)$$

と変換し、式(4-46)を代入すると、濃度  $C$  に対して、

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\sigma - \rho}{\sigma \rho} \frac{\partial K(n) C^2}{\partial z} = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial}{\partial z} \left( K(n) C \frac{\partial p_{so}}{\partial z} \right) \quad (4-52)$$

が成立する。

$\partial p_{so}/\partial z = 0$  であれば、Kynch の理論となり、式(4-52)は Kynch の理論を圧密沈降区間まで拡張したものと考えられる。

いま、底泥中の排水が一軸的で Darcy 則に従い、底泥の圧縮は空げき率の時間的、空間的変化のみによりおこり、かつ一軸的であると仮定して、

$$m_v = - \frac{\partial n}{\partial p_{so}} \quad (4-53)$$

なる体積圧縮係数を導入すると,

$$\frac{\partial p_{so}}{\partial z} = \frac{\partial p_{so}}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial z} = - \frac{1}{m_v} \left( - \frac{1}{\sigma} \right) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{1}{m_v \sigma} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4-54)$$

なる関係が得られる。これを式(4-52)に代入すれば,

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\sigma - \rho}{\sigma \rho} \frac{\partial K(n) C^2}{\partial z} = \frac{1}{\sigma \rho g} \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{K(n)}{m_v} C \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (4-55)$$

が得られる。 $K(n)$ ,  $m_v$ が与えられれば, 式(4-55)を数値解析して $C$ の時空間分布が求められる。この場合, 前述したごとく, 圧密度が大きくなると, 境界が変化する(界面が沈降する)ので, 次の式を満足するように, 時々刻々に境界条件を変化させなければならない。

$$C_0 H_0 = \int_0^H C dz \quad (4-56)$$

$K(n)$ ,  $m_v$ の特性については, 粟谷らや松岡らによって検討されているが,  $n$ に対する傾向は説明できるが, 値そのものを規定することは困難で, 実験ごとに述べる定数の範囲を越えていない。

#### 4.6.5 最終状態の支配方程式と特性

著者の興味は, 沈降現象もさることながら, 最終状態の堆積特性にあるので, それについて考察する。最終状態では,  $u_s = 0$ であるので, 式(4-50)より,

$$\frac{\partial p_{so}}{\partial z} = - (1 - n)(\sigma - \rho)g \quad (4-57)$$

が成立する。式(4-54)の関係をを用いると,

$$\frac{1}{m_v} \frac{\partial C}{\partial z} = - (\sigma - \rho)gC \quad (4-58)$$

となる。式(4-58)は最終状態における $C$ の鉛直分布を表わす微分方程式である。 $m_v$ の関係が与えられれば, 式(4-58)を解いて $C$ の鉛直方向分布状態が明らかとなる。式(4-53)を変形すれば,



$$\frac{1}{m_v} = - \frac{\partial p_{so}}{\partial n} = - \frac{\partial e}{\partial n} \frac{\partial p_{so}}{\partial e} \quad (4-59)$$

となる。ここで  $e$  は間げき比である。 $p_s$  と  $e$  の関係は確定的なものはないが、松尾・嘉門<sup>22)</sup> はヘドロの圧密結果から、 $e$  と  $p$  の関係として

$$d e = - C_c \frac{0.435}{p_{so}} d p_{so} \quad (4-60)$$

を得ている。ここで  $C_c$  は圧縮指数（無次元）で、ヘドロの種類によって  $C_c = 0.57 \sim 0.78$  の値をとる。自重圧密の場合も、この関係が成立するとすれば、

$$\frac{1}{m_v} = \frac{1}{(1-n)^2} \frac{p_{so}}{0.435 C_c} = \frac{\sigma^2}{C^2} \frac{p_{so}}{0.435 C_c} \quad (4-61)$$

となる。また  $p_{so}$  は式 (4-62) よりで与えられる。

$$\begin{aligned} p_{so} &= p_{so1} \exp\left(\frac{e_1 - e}{0.435 C_c}\right) \\ &= p_{so1} \exp\left(\frac{\sigma}{0.435 C_c} \cdot \frac{1}{C_1}\right) \exp\left(-\frac{\sigma}{0.435 C_c} \cdot \frac{1}{C}\right) \end{aligned} \quad (4-62)$$

ここで、 $(1-n) = 1/(1+e)$  と式 (4-51) より  $(1+e) = \sigma/C$  なる関係を用いた。式 (4-61) 式 (4-62) を式 (4-58) に代入して整理すれば、

$$d z = - B_1 A_c \frac{\sigma^2}{C^3} \exp\left(-A_c \sigma \frac{1}{C}\right) d C \quad (4-63)$$

となる。ここで

$$B_1 = \frac{p_{so1}}{(\sigma - \rho) g} \exp\left(A_c \sigma \frac{1}{C_1}\right) \quad (\text{次元: } L^1) \quad (4-64)$$

$$A_c = \frac{1}{0.435 C_c} \quad (\text{無次元}) \quad (4-65)$$

である。式 (4-63) より  $C > 0$  の範囲において  $C$  は  $z$  の単調減少関係である。

また、

$$\frac{d^2 z}{d C^2} = B_1 A_c \frac{\sigma^2}{C^5} (3 C - A_c \sigma) \exp(-A_c \sigma / C) \quad (4-66)$$

であるので、 $C \sim z$  曲線は  $C = C_p (= A_c \sigma / 3)$  に変曲点を持つ。 $C < C_p$  においては  $z$  に関して上に凸な関数となる。いま、 $\sigma = 2.3$  (kg/l),  $C_c = 0.78$  とすると  $C_p = 2.26$  (kg/l) となる。一方、均一粒径の球の最密充てんでの  $n$  の値は 0.26 であり、この場合は  $C = 1.702$  (kg/l) また通常の土について圧密荷重が  $1.47 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> でも  $n = 0.45$  で  $C = 1.265$  (kg/l) である。このように自然状態での土は、通常  $C < C_p$  が成立していると考えられる。よって圧密状態での  $C$  は  $z$  に対して上に凸は単調減少関数、すなわち界面に近づくにつれて濃度の減少が急になる特性を示すことがわかる。

式 (4-63) を  $C$  について積分すれば、

$$z = -B_1 \exp\left(-A_c \frac{\sigma}{C}\right) \left(\frac{\sigma}{C} + \frac{1}{A_c}\right) + H_* \quad (4-67)$$

ここで、

$$H_* = B_1 \exp\left(-A_c \frac{\sigma}{C_b}\right) \left(\frac{\sigma}{C_b} + \frac{1}{A_c}\right) \quad (4-68)$$

$$C_b = \frac{1}{\frac{1}{C_1} - \frac{1}{A_c \sigma} \ln \frac{p_{sob}}{p_{so1}}} \quad (4-69)$$

$$p_{sob} = C_0 H_0 \frac{\sigma - \rho}{\sigma} g \quad (4-70)$$

である。 $H_*$  は界面高さを表わす。なぜならば  $C \rightarrow 0$  なるとき式 (4-67) の右辺第一項は、 $\exp(-A_c \sigma / C)$  が急減少関数のため、0 に収束し、

$$z \longrightarrow H_* \quad \text{for } C \rightarrow 0 \quad (4-71)$$

となる。

いま、松尾・嘉門のヘドロに対する  $d e \sim d(\log p_{so})$  の実験結果<sup>22)</sup> をもとに、 $C_c = 0.7$ ,  $C_1 = 0.767$  (kg/l),  $p_{so1} = 4.5 \times 10^4$  (N/m<sup>2</sup>),  $\sigma = 2.3$  (kg/l) とし、 $w_0 = 1000$  (%),  $H_0 = 0.23$  (m) の条件で最終状態の  $C \sim z$  曲線を計算する。この条件では、 $C_0 = 0.458$  (kg/l) となり、 $z = 0$  (m) において  $C = C_b$  という境界条件を考慮すれば、 $C \sim z$  曲線は

$$z = -2.78 \times 10^4 \exp\left(-\frac{6.81}{C}\right) \left(\frac{2.3}{C} + 0.34\right) + 0.054 \quad (\text{m}) \quad (4-71)$$

となる。図 4-22 に、式 (4-71) で計算した結果と、 $w_0, H_0$  が同一条件の、カオリナイトと Kasumi Mud1 の実験結果を示す。計算値と実験値では、値こそ異なるが定性的性質はよく合致している。よって底泥における  $e$  と  $p_{so}$  の関係は

$$de \propto d(\log p_{so})$$

(4-72)

が成立すると考えられる。 $de-d(\log p_{so})$  の関係が与えられれば、最終状態での底泥の堆積状態が予想できる。

各底泥について、 $de-d(\log p_{so})$  が一義的に決まるとすれば、 $C_0$  が異なっても、 $W_s/A_0$  ( $W_s$ : 底泥の乾燥重量,  $A_0$ : 底沈降筒の面積) が同じであれば、最終状態での  $C \sim z$  の関係は同一のものになるはずである。その理由は、

$$W_s / A_0 = C_0 H_0$$

(4-73)

であるので、式(4-64), (4-70)より、 $z = 0$  (m) における  $p_{sob}$ ,  $C_b$  が等しくなる。よって界面高さ  $H_*$  も等しくなり、式(4-67)は全く同一の関係式となる。しかし、実験結果は、図4-23に示すように、 $W_s/A_0$  が同一でも  $C_0$  が異なれば  $C \sim z$  曲線は異なったものとなる\*。 $C_0$  が大きい

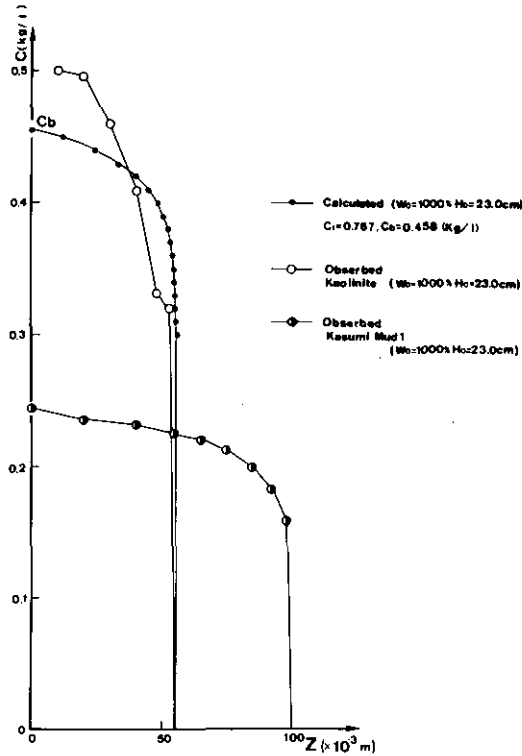


図 4-22 最終沈降状態での底泥濃度の鉛直方向分布の計算結果  
 Fig. 4-22 Calculated results of depth profile of mud density at the final settling stage

\* 座標  $z'$  では界面が原点であり、 $z$  と逆になっていることに注意

ほど、即ち初期含水比が低い底泥ほど $C_0$ も大きく、より締まっている。また、 $C_0$ が同一であれば、 $W_s/A_0$ が異なる条件でも界面から等しい深さでの $C$ の値はほぼ等しくなる。

このように、 $e$ が大きな領域での式(4-72)の関係は、同一底泥でも一義的に決まらず、 $C_0$ の値によって異なる結果となった。この原因としては、底泥の内部構造が $C_0$ によって異なるものが形成されること、 $C_0$ が小さくなると大型粒子が早く沈降するというような粒度分布の影響が現れることなどが考えられる。

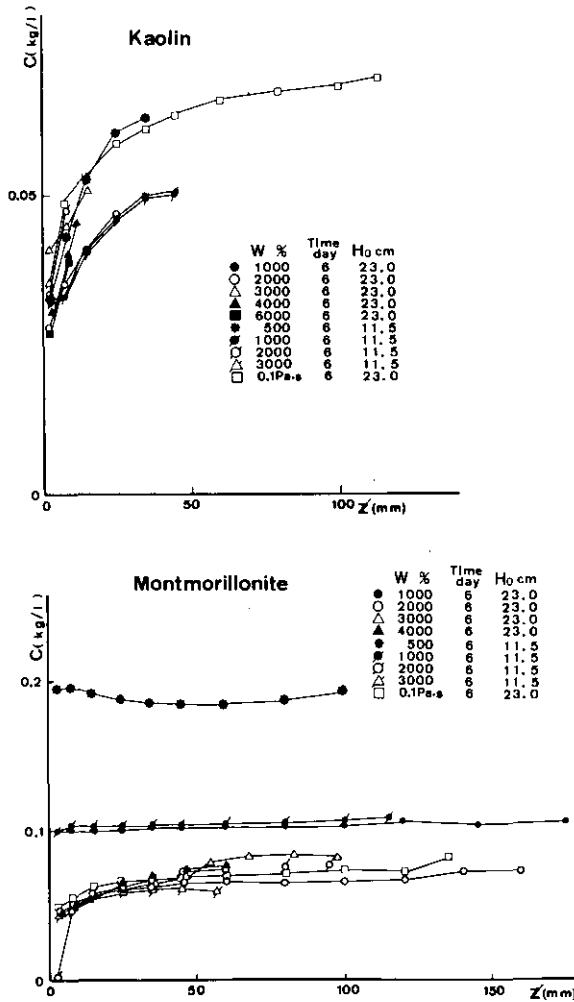
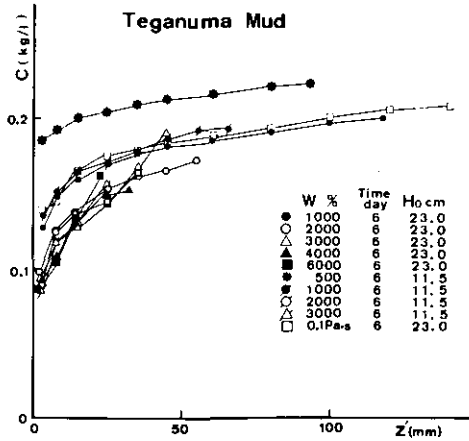
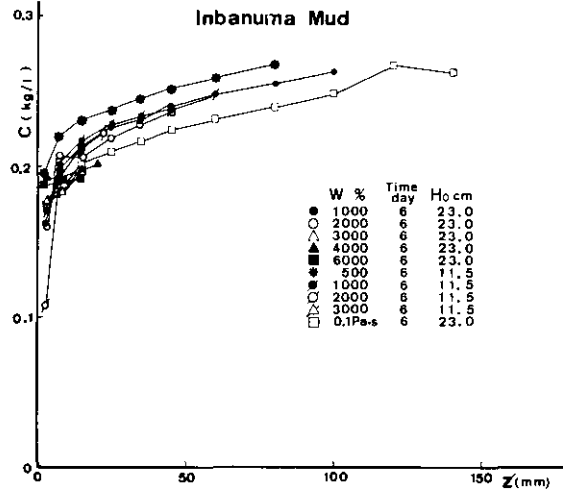
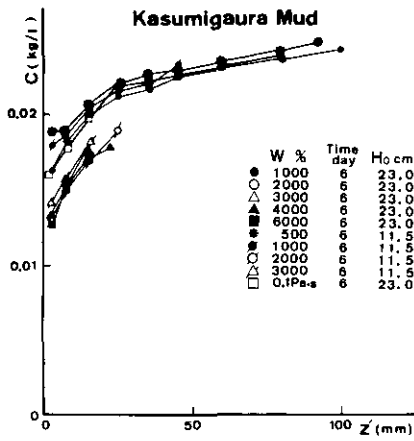


図 4-23 最終沈降状態での底泥濃度の鉛直方向分布の実験結果 ( $z' = 0$  が界面)

Fig. 4-23 Experimental results of depth profiles of mud density at the final settling stage



☒ 4-23 (つづき)

Fig. 4-23 (Continued)

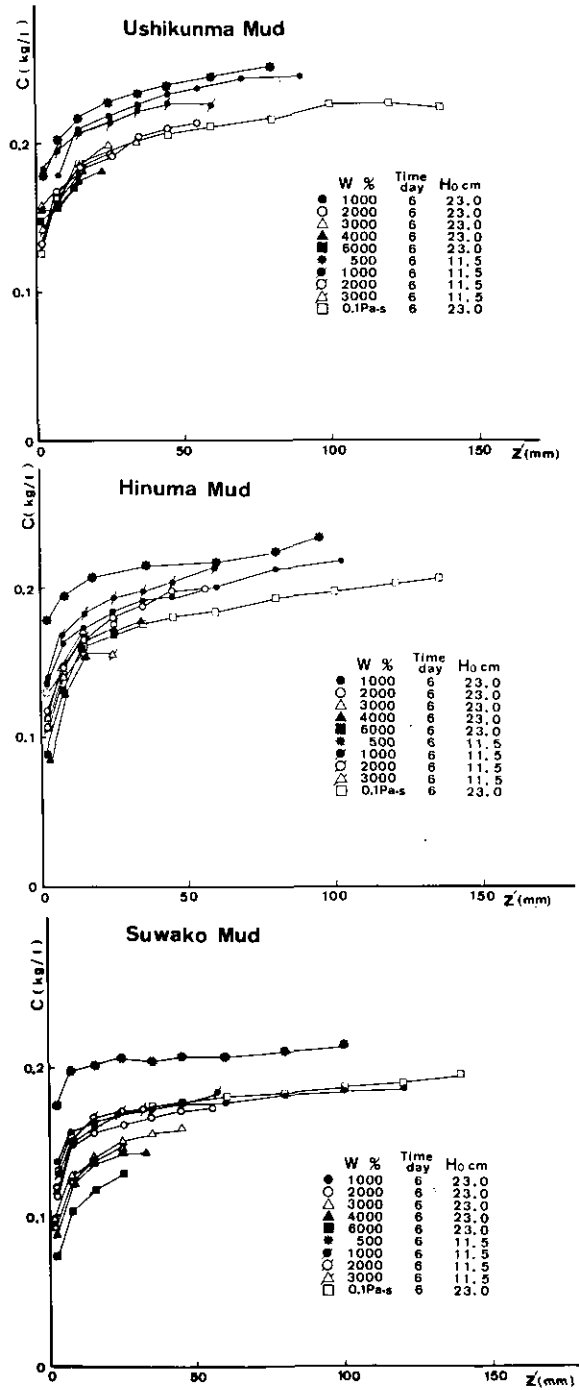


図 4-23 (つづく)

Fig. 4-23 (Continued)

#### 第4.7節 結論

本章では、底泥の沈降特性に関する実験的理論的研究を行った。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も、また他の物性値とともに流送特性との関係を検討するうえでも必要である。そのため初期濃度が比較的高い場合の底泥の静水沈降実験を行い、底泥の種類、初期含水比および初期高さが、最終状態での沈降高さや含水比の鉛直方向分布に、及ぼす影響を検討した。その結果、同一初期含水比条件でも、底泥の違いにより全く異なった沈降形態が現れた。その原因は、土粒子に吸着する陽イオンの種類にあると推論した。これを確認するために、吸着陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。底泥は沈降の形態により、二つの底泥グループに分類される。第一底泥グループは界面沈降を呈するもので、吸着陽イオンが  $H^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Al^{3+}$  のとき実現される。第二底泥グループは沈積面の出現と微細粒子の高濃度分散系を呈するもので、吸着陽イオンが  $Na^+$  のとき起こる。

最終沈降体積比は、同一含水比条件でも底泥の種類により異なったが、初期状態での粘度  $\eta_0$  が同一条件では、底泥によらずほぼ等しい値となった。

底泥の沈降現象は、圧密沈降区間に入る前までは Kynch の理論が成立するが、圧密沈降区間や最終状態では成立しないことがわかった。沈降現象に対して、固液二相流の立場から、自重圧密も含めた沈降現象全般を記述する拡散型偏微分方程式を導いた。そりをもとに、最終状態での含水比（濃度）の鉛直方向分布を示す関係を求めた。そして底泥の間げき比が有効応力の対数に比例すると仮定すれば実験結果と理論値の分布形がよく合うことが明らかとなった。しかし、間隙比と有効応力の関係式の中の定数は同一底泥でも初期含水比により異なることが推察された。

#### 参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾 (1982) : 底泥の沈降特性に関する研究, 土木学会第 37 回年次学術講演概要集第 2 部, 159-160.
- 2) 大坪国順・村岡浩爾 (1983) : 底泥の沈降特性に関する研究, 第 27 回水理講演会論文集, 317-322.
- 3) 大垣真一郎・松尾友矩 (1973) : 高濃度懸濁液の流動特性について, 土木学会文報告集, 第 210 号, 21-32.
- 4) 北浦嘉之・長瀬洋一 (1967) : 凝集性懸濁液の粘度と管内乱流, 化学工学, 31, (12), 15-20.
- 5) 日本粘土学工学会編 (1967) : 粘土ハンドブック, 技報堂, 95-137.
- 6) 近藤保 (1978) : 現代コロイド科学, 三出版.
- 7) 田丸謙二編 (1980) : 岩波講座, 現代化学 16, 界面の化学, 岩波書店.
- 8) 向坊隆編 (1966) : 岩波講座, 基礎工学 13, 材料の構造と性質 III, 岩波書店.
- 9) 川口桂三郎・熊田恭一・青峯重範・古坂澄石・佐々木清一・高井康雄・山根一郎・船引真吾 (1974) : 改訂新版 土壌学, 朝倉書店.
- 10) Yong, R. N. and B. P. Workentin (山内豊聡・竹中隆・東山勇・前田隆 監訳) (1978) : 新編土質工学の基礎, 鹿島出版会.

- 11) 赤井浩一：朝倉土木工学講座5，土質工学，改訂版，朝倉書店。
- 12) 井出哲夫編著（1976）：水処理工学 — 理論と応用 —，技報堂。
- 13) 化学工学協会編：化学工学便覧，丸善，898-902。
- 14) 森芳郎・吉岡直哉編：詳論 化学工学，朝倉書店，329-374。
- 15) Kynch, G. J. (1952) : A theory of sedimentation. Trans. Fraday Society, **48**, 166-176.
- 16) 三笠正人（19663）：軟弱粘土の圧密，鹿島出版会。
- 17) 村田康弘（1979）：泥の沈降・圧密現象における水質の挙動に関する研究，京都大学修士論文。
- 18) 粟谷陽一・藤崎一裕（1978）：圧縮沈降に関する一考察，第33回土木学会年次学術講演会講演概要集 第2部，353-354。
- 19) Kos, P. and P. D. Adrian (1975) : Transpont phenomena applied to sludge dewatering, Proc. A. S. C. E., **111**, EE 6, 945-965.
- 20) 粟谷陽一・楠田哲也・古賀憲一（1976）：汚泥の圧縮沈降に関する基礎的研究，第13回衛生工学研究討論会講演論文集，142-148。
- 21) 松岡讓・村田康弘・住友恒・岩井重久（1979）：泥の圧縮・沈降に関する数値解析，第15回衛生工学研究討論会講演論文集，34-40。
- 22) 松尾新一郎・嘉門雅史（1973）：物理化学的見地からのいわゆるヘドロ工学的性質について，土木学会論文報告集，第209号，103-113。



## 第5章 底泥の流動曲線

### 第5.1節 概説

1920年ころ、アメリカの物理化学者 Bingham はペイント、粘土ペースト、印刷インキなどの流動性に興味を抱き、レオロジーという新しい科学の分野を創設した。この頃のレオロジーの実験材料として、土が用いられた事実が示すように、土の挙動は非常にレオロジー的である<sup>1),2),3),4),5),6)</sup>。底泥や土壌なども含めて、一般に土はさまざまな特筆すべき性質を示す。第一は、粉体的な姿、すなわち、いろいろな粒度からなり、これらの集合体からなっており多くの間げきをもつ構造である点である。第二は、水との相互作用が著しい点である。土は含水比の大小により、弾性率や降伏値が変化する。第三は、塑性挙動を示す点である。第四に締め固め特性、すなわち充てんの問題がある。第三と第四の性質は、土のマクロ的な性質でマイクロレベルでの粉体と間げきとの関係や、粒子との水の相互作用などに影響される点で、第一、第二の性質から派生したものとも考えられる。

底泥のレオロジー的性質としては、弾性、粘性、塑性が挙げられる。この章では、粘性、塑性に関係する底泥の流動特性について述べる。流動特性とは、一言で定義すれば、「せん断応力とずり速度の関係を示す流動曲線の特徴」である。

底泥の流動特性は、含水比によって変化する。一般に、濃度  $C$  が十分希薄で、粒子間の相互作用が無視できる場合には、粘性係数が、Einstein の粘度式で与えられるニュートン流動となる。しかし、濃度が高くなると、非ニュートン流動となり降伏値をもつようになる。またこの場合、チキソトロ皮的性質も有するようになる。非ニュートン流体の流動曲線を求めるためには、ずり速度を連続的に変化させることができる粘度計が必要である。従来、この目的でストーマー式等の回転粘度計やコーンプレート型粘度計、水平細管型粘度計等が用いられてきた。しかし、これからの測定器では、ずり速度とせん断応力の関係は離散的にしか求まらず、ずり速度の小さな領域の精度が悪い。そのため、粘土ペーストや土壌ペーストの流動曲線に対しては、高ずり速度領域の流動曲線を直線近似し、ビンガム流体としての粘度降伏値が求られてきた。著者は、ずり速度が連続的可変の高精度の二重円筒式回転粘度計を用いることによって、ずり速度が0付近に注目して、粘度と降伏値を求めた。底泥の流送を考えるにあたっては、微小ずり速度領域の流動特性が深く関与していると思われる。

種々の底泥について、含水比を変化させて流動曲線を求めた。底泥は、チキソトロピックな物質なので、粘度計のローターの回転数の変化率などの測定条件を一定とした。また、カオリナイトなどの粘土に対しては、吸着陽イオンの影響を調べた。また、一部の底泥については、泥温の

影響も検討した。さらに、チクソトロピックな特性を考察するために、粘度計のローターの回転数の変化率を変えた実験も行った。

実験の結果、底泥の懸濁液の流動特性にも二つの底泥グループの違いが現れること、粘度と降伏値に一定の関係があること、粘度は最終沈降体積比で整理できることなどが明らかとなった。

## 第 5.2 節 実験条件およびその方法

### 5.2.1 粘度計

流動特性の測定装置は、内筒が回転するサーレ型二重円筒式回転粘度計である。回転粘度計の特徴は、操作が簡便で、試料が少なくて済むことである。しかし、今回用いた装置の最大の特徴は、ずり速度が任意に連続可変であることである。図 5-1 は、本装置が操作可能な回転数と時間の関係である。

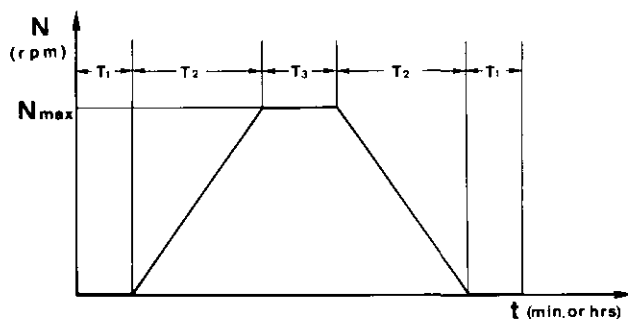


図 5-1 粘度計のローター回転数の時間変化曲線

Fig. 5-1 Time variation of revolution numbers of viscometer's rotor

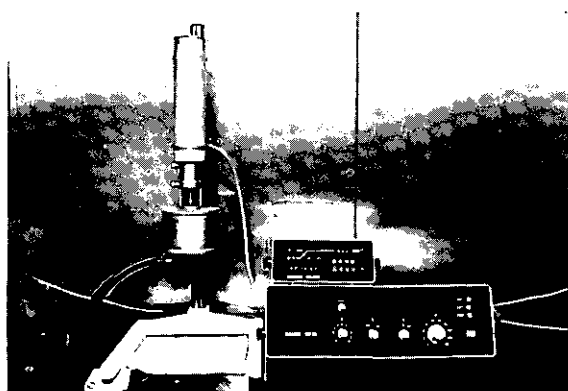


写真 5-1 二重円筒式回転粘度計

Photo 5-1 Rotary visco-meter (Double cylinder type)

図中、 $T_1$ は測定開始からローターが始動するまでの時間、 $T_2$ は最大回転数に到るまでの時間、 $T_3$ は最大回転数の状態に達する時間である。 $N_{max}$ はローターの最大回転数(rpm)である。写真5-1は測定装置の全容である。

図5-2は、測定結果の一例である。条件は、含水比600%、泥温20℃の諏訪湖泥である。降伏値の存在と、 $N=10$  rpmで曲線が屈曲しているのがわかる。また、ずり速度の上昇と下降とでは曲線が異なっている。これは底泥のチクソトロピックな性質による。

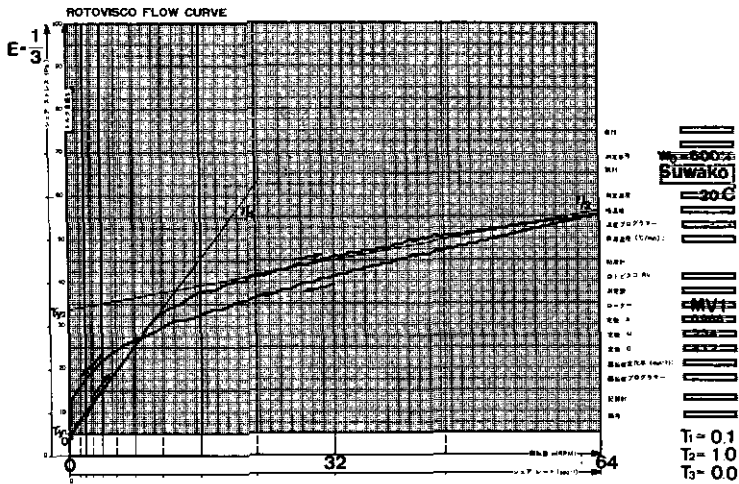


図 5-2 底泥の流動曲線の測定例

Fig. 5-2 Example of mud flow curve

### 5.2.2 測定方法

各濃度に調整した試料を、外筒に所定量(ローターAの場合: 40 ml, ローターBの場合: 9 ml)を入れ、温度を一定にして測定する。実験目的ごとの実験条件を、表5-1に示す。各実験ごとに、原則として3回の測定を行った。Series Iは各種底泥の含水比による変化を調べる実験, Series IIは吸着性陽イオンの影響を調べる実験, Series IIIは泥温の影響を, Series IV, Vはチクソトロピックな性質を調べる実験である。

### 5.2.3 底泥試料

流動曲線を求めた底泥の試料と測定した含水比の範囲を、表5-2に示す。含水比は対数目盛であり、表中の記号は後述する流動曲線の型を示す\*。底泥はすべて蒸留水を用いて所定の含水比に調整した。底泥試料番号3, 7, 12, 17, の粘土の有機物含有率は全て10%である。

\* 5.3.2 参照

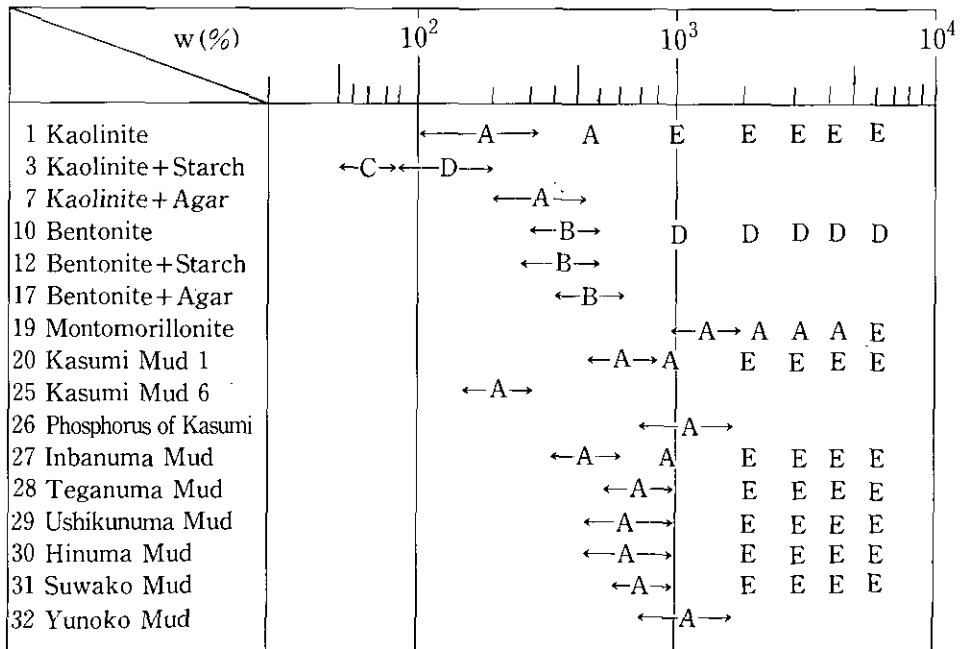
表 5-1 流動曲線の測定条件

Table 5-1 Experimental conditions for measuring the mud flow curve

Series	Materials	Mud Temperature °C	T <sub>1</sub> (mm)	T <sub>2</sub> (mm)	T <sub>3</sub> (mm)	N <sub>mon</sub> (r.p.m)
I	Clays Muds etc.	20	0.1	1	0	64
II	Kaolinite Bentonite Montmorillonite	20	0.1	1	0	64
III	Montmorillonite Kasumi. Mud I	5, 10 20, 30	0.1	1	0	64
IV	Montmorillonite w <sub>0</sub> =1500%	20	0.1	0.5, 1 2, 4 8,	0	64
V	Montmorillonite w <sub>0</sub> =1500% Kasumi. Mud I w <sub>0</sub> =	20	0.1	1	0	16, 32 64, 128 256

表 5-2 底泥の種類と流動曲線の特徴

Table 5-2 List of muds and clays and the characteristics of mud flow curves



第5.3節 流動曲線の特徴

5.3.1 解析の方法

二重円筒回転粘度計は、共通の軸を有する二つの円筒からなっており、二つの円筒のうち一方を固定し、他の円筒に回転を与える。一定のトルク  $M$  を与えて円筒の角速度  $\Omega$  を求める方法と、逆に角速度を与えてトルクを求める方法がある。今回用いた粘度計は、5.2.1 で示したように後者の方法である。

内筒面および外筒面に働く接線応力を、それぞれ  $\tau_a$ 、 $\tau_b$  で表せば、 $h_0$  をローター高さとして

$$M = 2\pi h_0 a^2 \tau_a = 2\pi h_0 b^2 \tau_b \quad (5-1)$$

となる。これから  $\tau_a > \tau_b$  なることがわかる。外筒が固定し、内筒が一定角速度  $\Omega$  で回転しているとする。軸から距離  $r$  にある液体粒子が行なう円運動の角速度を  $\omega(r)$  で表すと、ずり速度は

$$\dot{r} = -r \frac{d\omega}{dr} \quad (5-2)$$

で与えられる。

試料の流動曲線を  $f(\tau)$  とすれば

$$\dot{r} = f(\tau) \quad (5-3)$$

また、 $M = 2\pi h_0 r \tau$  より

$$-r \frac{d\omega}{dr} = \frac{M}{\pi h r^2} \frac{d\omega}{d\tau} = 2\tau \frac{d\omega}{d\tau} \quad (5-4)$$

であり、式(5-3)は結局

$$2\tau \frac{d\omega}{d\tau} = f(\tau) \quad (5-5)$$

となる。境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} \tau = \tau_a & : \omega = \Omega \\ \tau = \tau_b & : \omega = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5-6)$$

である。式(5-5)を積分すると

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\tau_b}^{\tau_a} \frac{f(\tau)}{\tau} d\tau \quad (5-7)$$

測定によって  $M-\Omega$  の関係を知って  $f(\tau)$  を求めるわけであるが、これは一般にかなり面倒である<sup>7)</sup>。これとは逆に、流動曲線を仮定すれば、式(5-7)から  $M-\Omega$  の関係が求められる。したがって、それを  $M-\Omega$  の測定結果と比較し、両者が合うような流動曲線を探す方法がしばしば用いられる。

(i) ニュートン流体

ニュートン流体においては、

$$f(\tau) = \tau / \eta \quad (5-8)$$

であるので、この関係式(5-7)より、

$$Q = \frac{1}{4\pi h_0} \left( \frac{1}{a_k^2} - \frac{1}{b_k^2} \right) \frac{M}{\eta} \quad (5-9)$$

よって、 $M-\Omega$  の関係は直線となり、 $\Omega/M$  の値から  $\tau$  が求められる。

(ii) ベキ法則にしたがう流体

流動曲線が

$$f(\tau) = \frac{1}{k_f} \tau^m \quad (1 < m) \quad (5-10)$$

で表わされる場合は、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} \int_{r_0}^{r_a} \frac{1}{k} \tau^{m-1} d\tau \\ &= \frac{1}{2m} \left( \frac{1}{2\pi h_0} \right)^m \left( \frac{1}{a_k^{2m}} - \frac{1}{b_k^{2m}} \right) \frac{M^m}{k_f} \end{aligned} \quad (5-11)$$

したがって

$$\log Q = m \log M + \text{const.} \quad (5-12)$$

ただし、

$$\text{const.} = \log \left\{ \frac{1}{2m(2\pi h_0)^m} \left( \frac{1}{a_k^{2m}} - \frac{1}{b_k^{2m}} \right) \frac{1}{k_f} \right\} \quad (5-13)$$

である。

(iii) Bingham 流体

Bingham 流体の流動曲線は

$$\left. \begin{aligned} f(\tau) &= \frac{1}{\eta_B} (\tau - \tau_{yB}) && (\tau > \tau_{yB}) \\ &= 0 && (\tau < \tau_{yB}) \end{aligned} \right\} \quad (5-14)$$

ここで、 $\tau_{yB}$ は Bingham 降伏値、 $\eta_B$ は Bingham 粘度である。

Bingham 流体の場合、 $\tau_{yB}$ の値により  $\Omega$ - $M$ の関係は以下の三つに区別される。

$$\begin{aligned} Q &= 0 && (M < M_c) \\ &= \frac{1}{4\pi h_0 a_k^2 \eta_B} \left[ M - M_c - M_c \log \frac{M}{M_c} \right] && (M_c < M < s_1^2 M_c) \\ &= \frac{1}{4\pi h_0 a_k^2 \eta_B} \left[ \left(1 - \frac{1}{s_1^2}\right) M - 2 M_c \log s_1 \right] && (s_1^2 M_c < M) \end{aligned} \quad (5-15)$$

ここで、

$$s_1 = \frac{b_R}{a_R} \quad M_c = 2\pi h_0 a^2 \tau_{yB} \quad (5-16)$$

である。したがって  $\Omega$ - $M$ のグラフは図 5-3 のようになる。 $\Omega$ - $M$ 曲線は、 $M=M_c$ の点で横軸に接し、 $M > s_1^2 M_c$ では直線である。直線の傾きから  $\eta_B$ が求まる。この直線が横軸と交わる点を  $M_0$ とすれば

$$M_0 = \frac{2 s_1^2}{s_1 - 1} (\log s_1) M_c = \frac{2 s_1^2 \log s_1}{s_1 - 1} 2\pi h_0 a_k^2 \tau_{yB} \quad (5-17)$$

であるので、 $M_0$ から  $\tau_{yB}$ が求まる。

試料がビンガム流体であるか否かは、 $\Omega$ - $M$ 曲線から読み取った  $M_c$ 、 $M_0$ が

$$\frac{M_0}{M_c} = \frac{2 s_1^2}{s_1^2 - 1} \log s_1 \quad (5-18)$$

を満足するか否かで判断される。しかし、今までの粘度計では、 $M_c$ を求めるのが不可能であったため、試料がビンガム流体であるかを検証せず、ビンガム降伏値および粘度と呼んでききらいがある。

### 5.3.2 流動曲線の特徴<sup>9)</sup>

図 5-4 は、測定された流動曲線のうち、 $\dot{\gamma}$ が増加してゆく場合の典型的なものの模式図である。底泥の流送特性との関連性の観点から、底泥が静止状態から流動状態へ移行する場合の流動曲線

が重要と考えられる。

Type A が最もよく測定された型である。今回の粘度計においては、 $s_1=1.05$  なので底泥がビンガム流体であれば、 $\tau_{y2}/\tau_{y1}=M_0/M_c=1.05$  となるべきであるが、測定結果では  $\tau_{y2}/\tau_{y1}$  は 10 前後の値となり、底泥を、 $\tau_{yB}=\tau_{y1}$ 、 $\eta_B=\eta_2$  のビンガム流体として取り扱うことは不適當である。

Type A の流動曲線の特徴は、降伏値の存在と、流動曲線があるずり速度  $\dot{\gamma}_A$  で急に折れ曲がることである。そのため Type A の流動曲線は  $\dot{\gamma}$  の値によつて二つの流動曲線に区別するのが適當と考えられる。(図 5-4 (A) 参照)

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} (\tau - \tau_{y1}) \quad \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_A \quad (5-19a)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_2} (\tau - \tau_{y2}) \quad \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_A \quad (5-19b)$$

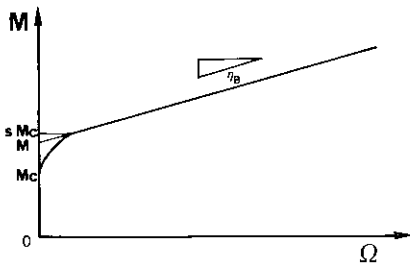


図 5-3 ビンガム流体におけるローターの角速度とトルクの関係<sup>7)</sup>

Fig. 5-3 Relationships between the angular velocity and tork of rotor for the Bingham liquid<sup>7)</sup>

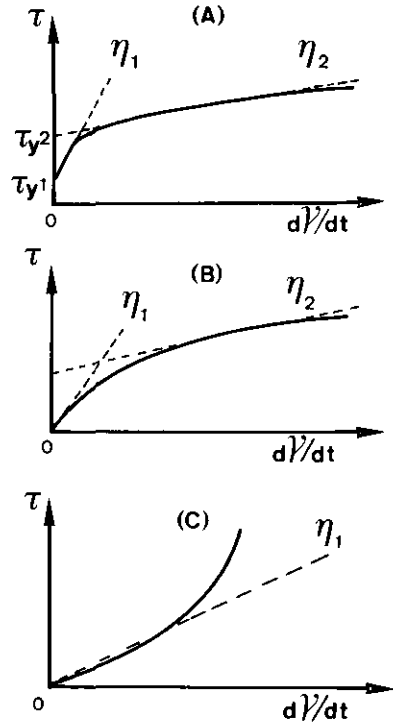


図 5-4 代表的な流動曲線および粘度と降伏値の定義

Fig. 5-4 Typical flow curves and the definitions of the viscosity and the yield value



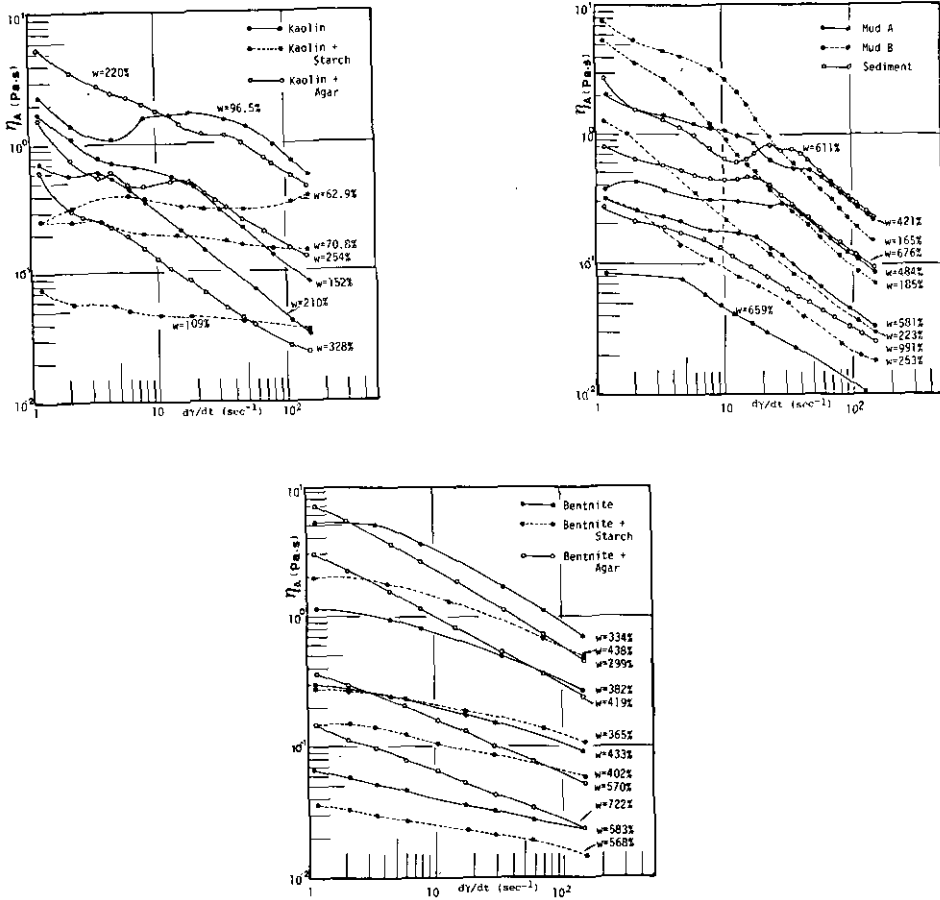


図 5-5 見かけの粘度（塑性粘度）とずり速度の関係  
 Fig. 5-5 Relationships between the plastic viscosity and the strain velocity

$\dot{\gamma}_A$ の値は、 $2 < \dot{\gamma}_A < 40 \text{ sec}^{-1}$ の範囲にあり、含水比の小さな試料ほど、 $\dot{\gamma}_A$ の値は大きくなる傾向がある。

Type Bの流動曲線は、本来ベキ法則が成立するものであるが、便宜上、図5-4(B)に示すように $\eta_1$ 、 $\eta_2$ を定義した。この場合 $\tau_{y1}$ は定義できない。

Type Cは、 $\dot{\gamma}$ の増加とともに $\eta$ が急激に増加するもので、ダイレタント流体と呼ばれる。このような特性を示す物質は少なく、今回の実験でも、デンプン含有カオリナイトの低含水比の場合のみに見られた。Type Cについては、図5-4(C)に示すように $\eta_1$ を定義した。

## 第5.4節 流動特性の実験結果

### 5.4.1 底泥の種類の影響

各底泥の流動曲線は表5-2に示すように分類された。表中A, B, C, はそれぞれ図5-4のType A, B, Cの流動曲線に対応する。Dはニュートン流体を, Eは含水比が高くなって,  $\tau_{y1} \doteq 0$ ,  $\eta_1 \doteq \eta_2$ となるが, ニュートン流体には分類できないものである。表中矢印で示される範囲は, 流送実験を行った範囲である。

表5-2から, 底泥の流動曲線は2つのグループに大別され, その区分は沈降特性のそれと一致することがわかった。すなわち, Type Aの流動曲線は第一グループの底泥\*に現れた。Type Bの流動曲線は第二グループの底泥\*\*に現れた。デンプン含有カオリナイトはどちらのグループにも分類されず,  $w < 90\%$ ではダイレタント流体となり,  $w > 120\%$ ではニュートン流体となった。沈降形態もこれに対応し,  $w < 90\%$ では沈降面が,  $w > 120\%$ では沈積面が現れた。第一グループの底泥は,  $w > 200\%$ でE typeとなり, チクソトロピックな性質は保存される。第二グループの底泥は, 高含水比ではニュートン流体となった。

図5-5は,  $\eta_A = \tau / \dot{\gamma}$ で定義される。見かけの粘度  $\eta_A$  と  $\dot{\gamma}$  の関係を示したものであり, カオリン主成分粘土, 現地泥, ベントナイト主成分粘土の三つに分類してある。図5-5にも, 二つの底泥のグループによる違いが現れている。第一グループの底泥の  $\eta_A \sim \dot{\gamma}$  曲線は, 途中で平坦部をばさんだ二つの減少曲線からなる。平坦となる  $\dot{\gamma}_A$  の値は, 流動曲線の屈曲点の  $\dot{\gamma}_A$  に対応する。 $\dot{\gamma}_A$  の値は,  $w$  が小さいほど大きい。第二グループの底泥は,  $\eta_A$  が  $\dot{\gamma}$  に対して両対数紙上でほぼ直線に減少している。流動曲線がベキ法則で表わされるならば,

$$\log \eta_A = \log \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \log \dot{\gamma} + \frac{1}{m} \log k_f \quad (m > 1) \quad (5-20)$$

が成立する。よって, 第二グループの底泥の流動曲線はベキ法則が成立することになる。

### 5.4.2 含水比の影響

図5-6は, 図5-4で定義された粘度  $\eta_1$  と含水比  $w$  との関係を両対数紙上に示したものである。各底泥とも, 含水比の増加に伴ない  $\eta_1$  が減少している。同一含水比でも, 底泥によって  $\eta_1$  の値に大きな差が現れる。カオリナイト, ベントナイトともデンプン含有により  $\eta_1$  は減少し, 寒天含有により  $\eta_1$  は増加する。霞ヶ浦の底泥では,  $\eta_1$  は沈降物 > Mud 1 > Mud6 の順となっている。 $\eta_1$  の大きなものほど,  $w$  の増加に伴ない  $\eta_1$  の減少の程度が少ない。現地泥では, 湯ノ湖泥 > 霞ヶ浦沈降物 > 手賀沼泥 > 諏訪湖泥 > 牛久沼泥 > 霞ヶ浦泥 > 印旛沼泥の順となっている。

\* 現地泥や非ベントナイト系の粘土であり, 沈降面を形成した。

\*\* ベントナイト主成分粘土であり, 沈積面を形成した。

全体的な傾向としては、 $w_L$  (L.L) が大きな底泥ほど、同一含水比での  $\eta_1$  は大きい。

図5-7は、 $\dot{\gamma}$  の大きな領域に適用できる粘度  $\eta_2$  と  $w$  との関係である。 $w$  に対する傾向は、 $\eta_1$  の場合と同じである。 $\eta_2$  は  $\eta_1$  の10分の1程度の値となっている。図5-7には大垣ら<sup>9)</sup>と須藤ら<sup>10),12)</sup>の結果を示してある。これから、大垣らや須藤らが測定した粘度は、 $\eta_2$  に対応していることがわかる。

図5-8、図5-9は、それぞれ降伏値  $\tau_{y1}$ 、 $\tau_{y2}$  と  $w_0$  の関係を示したものである。ほとんどの底泥において  $\tau_{y1}$  は  $\tau_{y2}$  の10分の1程度の値となる。降伏値も、粘度の場合と同様に含水比が高くなると低下する。大垣らの<sup>9)</sup>降伏値は  $\tau_{y2}$  に対応し、須藤ら<sup>11)</sup>の結果は  $\tau_{y1}$  に対応している。ここで、大垣ら<sup>9)</sup>と須藤ら<sup>10),11)</sup>の測定した粘度と降伏値が、今回求めた粘度および降伏値のどれに対応するか整理しておく。大垣ら<sup>9)</sup>の測定値は、 $\eta_2$ 、 $\tau_{y2}$  に対応する。須藤らは、 $\varphi < \varphi_0$  では、降伏値を無視し<sup>10)</sup>  $\eta_2$  のみを求め、 $\varphi > \varphi_0$  では  $\tau_{y1}$  を測定したが粘度はチグソトロピック性が著しいとして求めていない<sup>11)</sup>。ここで  $\varphi_0$  はニュートン流動をおこないうる最高体積濃度としている。しかし、今回の測定結果では、須藤らが与えた  $\varphi_0$  以下の条件でも、Type A の流動曲線を示した。

#### 5.4.3 吸着陽イオンの影響

4.5.5で吸着陽イオンの置換によって、粘土の沈降形態が変化することを示したが、ここでは、流動特性に及ぼす影響を検討する。実験に用いた試料は、4.5.5で用いたものと同一であり、カオリナイト、ベントナイト、モンモリロナイトを、それぞれ  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  に置換したものである。

カオリナイトは、 $\text{Na}^+$  に置換後は  $100 < w < 350(\%)$  でニュートン流動を示した。ベントナイトは  $\text{Ca}^{2+}$  に置換後は  $300 < w < 600(\%)$  の範囲で、流動曲線が type B から type A に変化した。図5-10、図5-11はそれぞれ置換前後の  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  と  $w$  との関係である。カオリナイトは  $\text{Na}^+$  置換により粘度が著しく低下した。ベントナイトは、流動曲線自体が異種なものであるので、単純な比較は難しいが、実験範囲内では  $\text{Ca}^{2+}$  置換粘土の方が小さく、 $w$  の増加とともに置換前のものに等しくなるか、逆に上回る傾向が認められる。モンモリロナイトはカオリナイトとは異なり  $\text{Na}^+$  置換により、粘度が増大している。 $w$  の増加とともに、置換前の値に急速に近づく。この結果は、須藤らの実験結果と一致している。また、Workentin *et al.*<sup>12)</sup> の粘土のせん断強さの実験においても、 $\text{Na}^+$  -モンモリロナイトが  $\text{Ca}^{2+}$  -モンモリロナイトよりせん断強さが大きく、 $\text{Na}^+$  の濃度が低いほどせん断強さが大きい結果を得ている。一般に  $\text{Na}^+$  が吸着陽イオンの粘土は、高含水比では分散しやすいことは既に見てきたが、モンモリロナイトのような高膨潤粘土においては、含水比が低い場合、斥力が強く引力の弱いものほど、せん断強さや液性限界値が増大する。一方、カオリナイトのような低膨潤性粘土では、逆の性質を示す。

高膨潤性粘土の場合、斥力の増加がせん断強さの増加となる理由は、次のように考えられる。せん断の進行中に、破壊面の粒子や構造単位は互いに平行に配向するようになる。この配向に対する抵抗力はせん断抵抗となる。粘土ペーストの濃度が高く、粒子間距離が小さいとき、粒子間

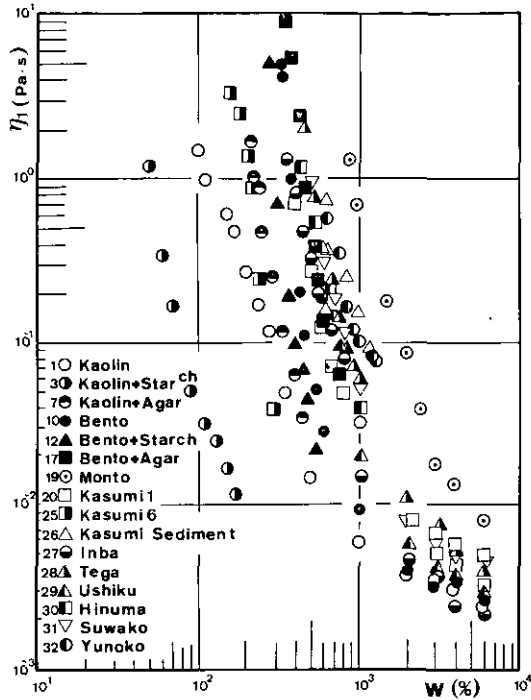


図 5-6 粘度  $\eta_1$  と含水比の関係  
 Fig. 5-6 Relationships between the viscosity  $\eta_1$  and the water content in percent of dry weight

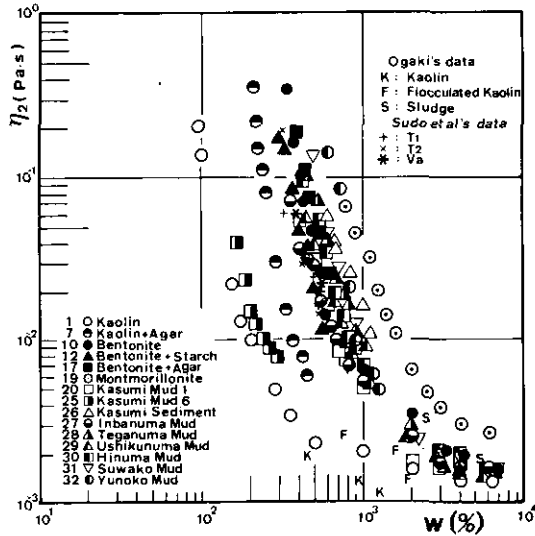


図 5-7 粘度  $\eta_2$  と含水比の関係  
 Fig. 5-7 Relationships between the viscosity  $\eta_2$  and the water content in percent of dry weight

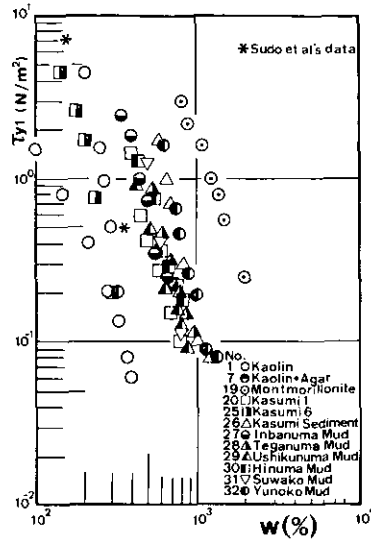


図 5-8 降伏値  $\tau_{y1}$  と含水比の関係  
 Fig. 5-8 Relationships between the yield value  $\tau_{y1}$  and the water content in percent of dry weight

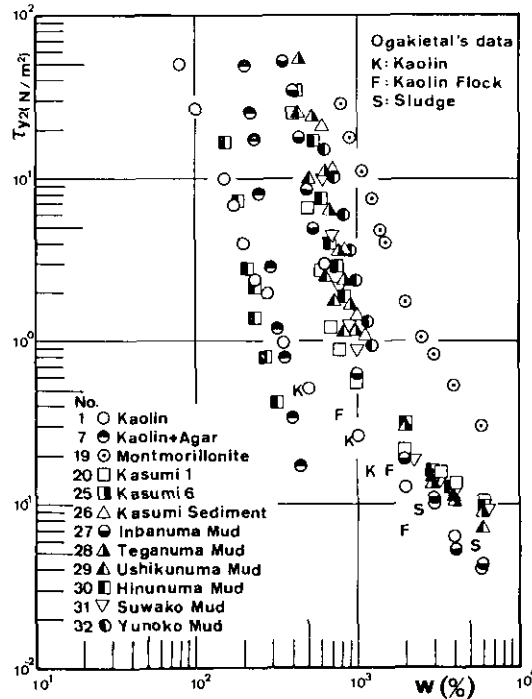


図 5-9 降伏値  $\tau_{y2}$  と含水比の関係  
 Fig. 5-9 Relationships between the yield value  $\tau_{y2}$  and the water content in percent of dry weight

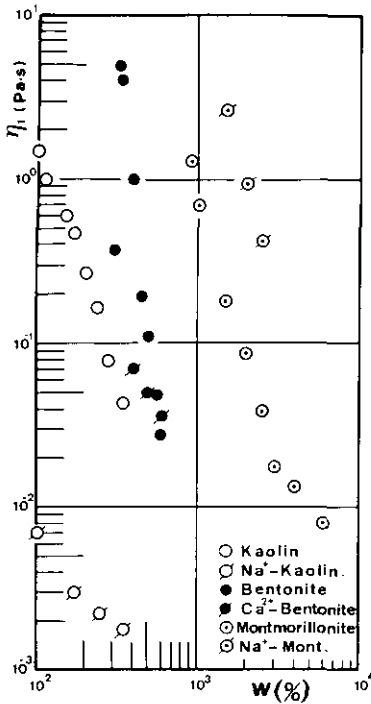


図 5-10 粘度  $\eta_1$  に及ぼす吸着陽イオンの影響

Fig. 5-10 Effects of the adsorbed cation on the viscosity  $\eta_1$

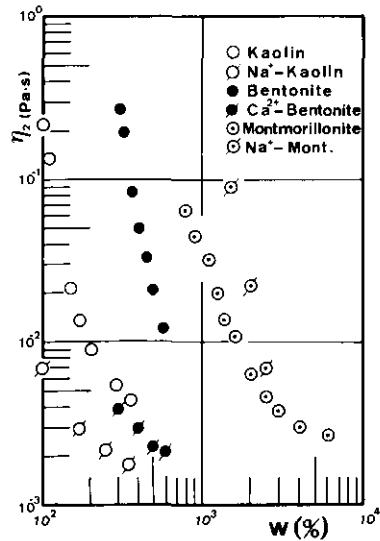


図 5-11 粘度  $\eta_2$  に及ぼす吸着陽イオンの影響

Fig. 5-11 Effects of the adsorbed cation on the viscosity  $\eta_2$

斥力は粒子の移動、すなわち配向に抵抗する。この場合、粒子間引力は小さく、粒子の凝集によるせん断強度は低下するが、それ以上に斥力による配向抵抗がせん断抵抗として働く。

一方、低膨潤粘土であるカオリナイトの剪断強さにおいては、Na<sup>+</sup>-カオリナイトがCa<sup>2+</sup>-カオリナイトに比して小さくなる。このような粘土は、引力が粒子間力として支配的であり、引力による粒子の凝集による強度の発生が、斥力による配向抵抗力を上回るため、凝集しやすい条件のほうが、粘度、せん断強さ、液性限界も増加する。カオリナイトにおいても、含水比がさらに小さくなると、Na<sup>+</sup>-カオリナイトの流動開始時の抵抗力はCa<sup>2+</sup>-カオリナイトより格段に大きくなるが、一旦流動し始めると急激に抵抗力が低下する。

粘度や強度に及ぼす陽イオンの影響は、粘土の種類によっても粘土の陽イオン交換容量と粒子間距離（含水比）のかね合いによっても変化する。斥力による配向に対する抵抗力が強大となる含水比が、カオリナイトでは  $w < 50$  (%) であり、モンモリロナイトは  $w > 2500$  (%) であるということである。このように考えると、図 5-10、図 5-11 の結果も理解できる。

5.4.4 泥温の影響

自然界における底泥の温度は、気温の影響を受けて変動している。岩熊<sup>13)</sup>によって測定された霞ヶ浦高浜入(水深2.2m)における鉛直方向の底泥温度のプロファイルの周年変動を、図5-12<sup>13)</sup>に示す。図より、泥の表層では、3.4℃から29.3℃までの振幅で、温度が年変動していることがわかる。そのため流送特性を考察するにあたっては泥温の影響を検討しておく必要があり、関連の深い流動特性についてまず泥温の影響を検討した。実験条件は5.2.2に示した。実験中、室温も泥温に合わせた。図5-13、図5-14は各温度に対する $\eta_1$ 、 $\eta_2$ と $w$ との関係である。また、図5-15、図5-16は、相対粘度 $\eta_1/\mu$ 、 $\eta_2/\mu$ と $w$ との関係である。 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ とも、結果にバラツキはあるが、泥温に対する特定の傾向が認められない。また、相対粘度は、同一含水比において泥温が低いものほど小さくなる。このことは底泥の粘度変化は、水の粘度変化の温度変化に追従しないことを示している。以上の結果から、今回測定した含水比、および泥温の条件下では、粘度に及ぼす泥温の影響は無視できること、また $\eta_1$ 、 $\eta_2$ に及ぼす水自体の粘性の影響もないと考えられる。しかし、さらに高い含水比条件や泥温が60℃以上では、泥温の影響が現れることが大垣<sup>9)</sup>らによって明らかにされている。

5.4.5 ずり速度の変化率や最大ずり速度の影響

底泥は静置しておくともゲル状態になり、外力や変形を与えられるとゾルとなって流動性をおび、これを繰返すことができる。このような、等温における可逆的なゾル-ゲル転移を、チキソトロピー

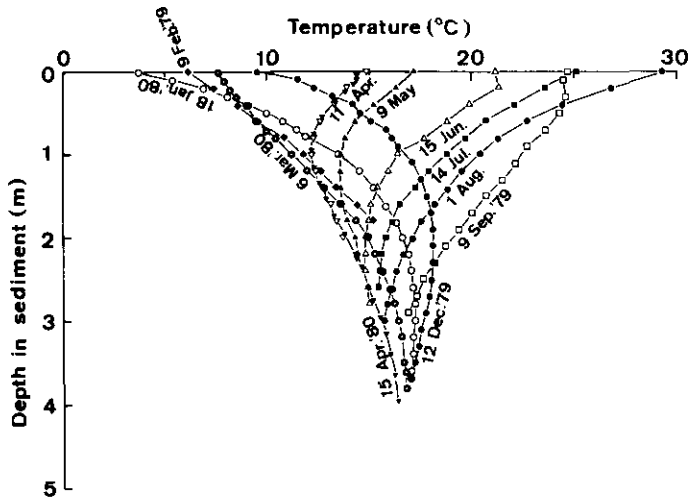


図 5-12 霞ヶ浦高浜入 st. 1 (水深 2 m)における鉛直方向の底泥温度プロファイルの周年変動<sup>13)</sup>

Fig. 5-12 Seasonal change in depth profile of mud temperature at Station 1 Takahamairi Bay of Lake Kasumigaura<sup>13)</sup>

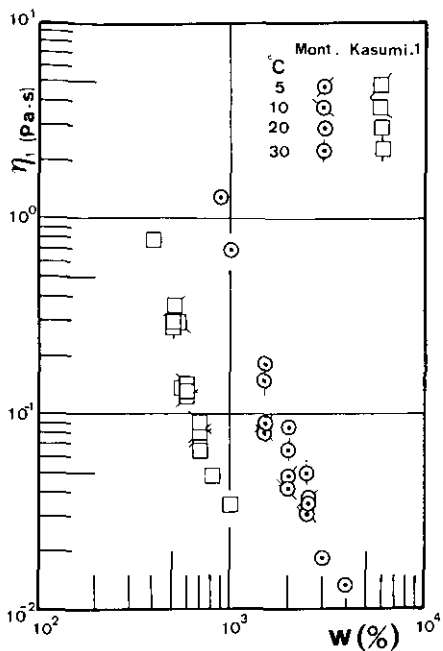


図 5-13 粘度  $\eta_1$  と含水比の関係に及ぼす泥温の影響

Fig. 5-13 Effect of mud temperature on the viscosity  $\eta_1$

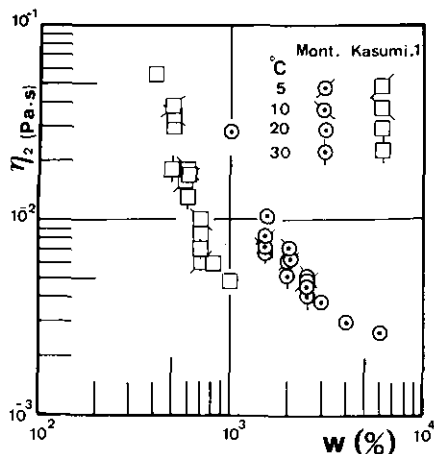


図 5-14 粘温  $\eta_2$  と含水比の関係に及ぼす泥温の影響

Fig. 5-14 Effect of mud temperature on the viscosity  $\eta_2$

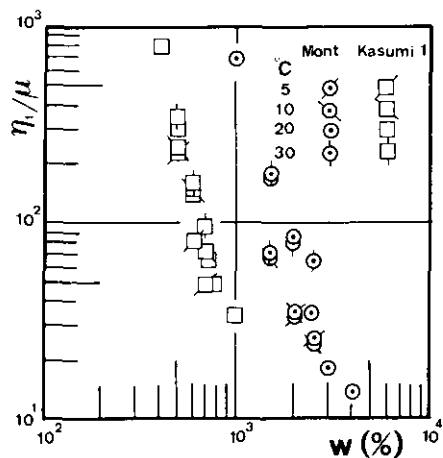


図 5-15 相対粘度  $\eta_1/\mu$  と含水比の関係に及ぼす泥温の影響

Fig. 5-15 Effect of mud temperature on the relative viscosity  $\eta_1/\mu$

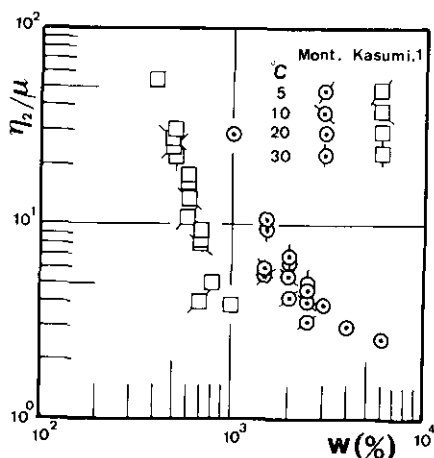


図 5-16 相対粘度  $\eta_2/\mu$  と含水比の関係に及ぼす泥温の影響

Fig. 5-16 Effect of mud temperature on the relative viscosity  $\eta_2/\mu$



(thixotropy)と呼ぶ。チキソトロピー現象は、一般には構造の内部破壊と再形成として考えられている。すなわち、ゾル化は内部破壊による軟化であり、ゲル化は再形成による硬化である。軟化においても、変形の与え方によって二つの型がある。一般にチキソトロピーは次の三つの場合に分類される。

i) ずりチキソトロピー (shear thixotropy)

定ずり速度でひずみを増加させた場合、初めは内部構造が破壊して軟化し、流動性を増すが、やがて壊れるものが全て壊れれば一定の粘度に落ちつく。

ii) ずり速度チキソトロピー (shear rate thixotropy)

i) で一定の粘度に落ちついたものでも、ずり速度を増加させればさらに軟化が起こって粘度が低下する。

iii) 逆ずり速度チキソトロピー (negative shear rate thixotropy)

内部破壊の進んだ物質に対して、回復してくる速度よりも、ずり速度を減少させる割合が遅くなると、逆に粘性がしだいに増大してゆく。

底泥の流動曲線は、ずり速度の大きさ、ずり速度の変化率の与え方によって、様々な形態となると考えられる。図5-2の測定結果例は、上昇曲線においてずり速度チキソトロピーが現れている。ずり速度が小さい領域で下降曲線が上昇曲線の上に来ているが、これは逆ずり速度チキソトロピーが現れていることを示す。今回の実験条件では、ほとんどの場合図5-2のような流動曲線の形態となった。しかし、ずり速度変化率を高くすると、図5-17(a)の模式図のように上昇曲線が常に下降曲線の上に現れた。逆に、ずり速度変化率を小さくすると、図5-17(b)のように下降曲線が上昇曲線の上に現れた。これらは、時間による軟化の速度過程と回復の速度過程との競争によって現れるものである。

流動特性としての、ずりチキソトロピー、ずり速度チキソトロピー、逆ずり速度チキソトロピー、塑性流動、非ニュートン流動などは、概念としては明確に区別されるが、実験の底泥の流動現象では、これらが複雑にからみあったものが現れており、これを測定において明確に分離して求めることは困難である。

ここでは、二種類の単純な実験を行なって、底泥のチキソトロピー的な性質を格討した。一つは、ずり速度の変化率の影響を見るためのものであり、他の一つは最大ずり速度の影響を見るためのものである。図5-18は、粘度計のローターの回転速度の時間変化曲線である。図5-19は、ずり速度の変化率が  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  に及ぼす影響を示したものである。今回の実験条件では、 $\eta_1$  は  $d\dot{\gamma}/dt$  の2分の1乗に反比例することがわかる。一方、 $\eta_2$  は  $d\dot{\gamma}/dt$  に関らず、ほぼ一定値となる。 $\eta_1$  に関する結果は次のように説明される。 $d\dot{\gamma}/dt$  が大きな場合ほど、同一経過時刻におけるひずみが大きいので、底泥の内部構造の破壊が進行し、 $\eta_1$  が小さくなる。一方、 $\eta_2$  に関しては、内部破壊が進んでしまったため、ずり速度チキソトロピーの影響が小さいこと、さらに、最大ずり速度が一定なので、ずりチキソトロピーの程度は同じために、 $\eta_2$  はほぼ一定になったと考えられる。

図5-20は、最大ずり速度が  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  に及ぼす影響を示したものである。ローターの回転数の時間

変化曲線は、図 5-18 において破線で示される。図 5-20 によれば、 $\eta_1$ ,  $\eta_2$ とも、 $\dot{\gamma}_{max}$ の増加に対して減少することがわかる。減少率はモンモリロナイトのほうが $\eta_1$ ,  $\eta_2$ とも大きい。 $\eta_1$ に関しては、図 5-19 の場合と同じ理由と考えられる。 $\eta_2$ に関しては、次の理由が考えられる。流動曲線は、

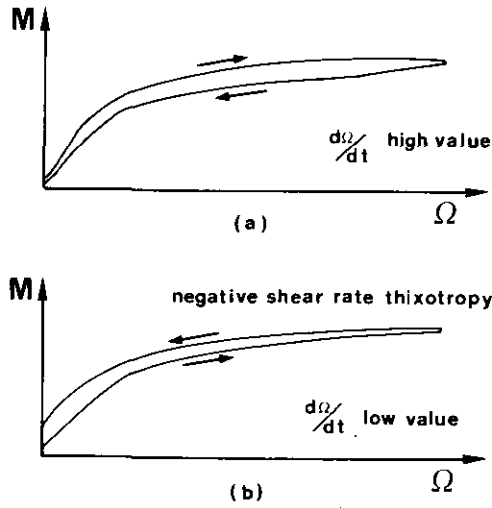


図 5-17 チキソトロピーによる流動曲線の変化  
Fig. 5-17 Changes of flow curves caused by thixotropy

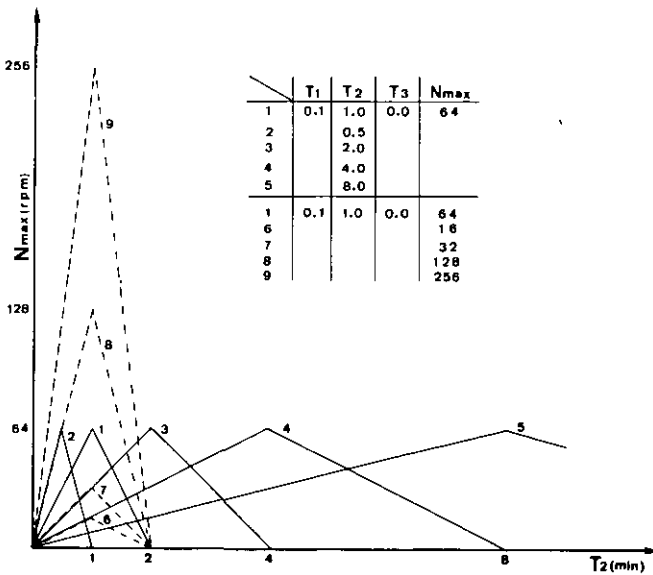


図 5-18 ローター回転数の時間変化条件  
Fig. 5-18 Temporal conditions of the revolutionary numbers of rotor

ずり速度チクトロピーのため、厳密には、ゆるく上に凸な曲線であるが、解析では直線近似して  $\eta_2$  を求めている。 $\dot{\gamma}_{max}$  が大きくなるにつれて、上に凸な曲線の影響が現われ、近似直線の勾配  $\eta_2$  が小さくなる。

図5-18より、ローター回転度の時間変化曲線が、初期において、Case 2とCase 8、Case 3とCase 7、Case 4とCase 6では同一条件であることがわかる。図5-21は上の三つの組み合わせについて、 $\eta_1$  および  $\eta_2$  を比較したものである。横軸の  $\eta_1, \eta_2$  はCase 2, 3, 4, の粘度を、縦軸の  $\eta'_1, \eta'_2$  は6, 7, 8の粘度を示す。比較のためCase 1については、 $\eta_1 = \eta'_1, \eta_2 = \eta'_2$  として併示した。 $\eta_1$  と  $\eta'_1$  は勾配1の直線上に乗り、ずり速度の変化率が同一であれば、 $\eta_1$  は  $\dot{\gamma}_{max}$  によらず一定となることがわかる。一方、 $\eta_2$  と  $\eta'_2$  は  $\eta'_2$  軸にほぼ平行になり、 $\eta_2$  はずり速度の変化率が同一でも、 $\dot{\gamma}_{max}$  が異なると一定値とならない。 $\eta_2$  は  $\dot{\gamma}_{max}$  によって決まるものと考えられる。

図5-19、図5-20における粘度とずり速度変化率および最大ずり速度との関係は、普遍的なものではなく、底泥の種類や含水比等の実験条件によって変化するものと考えられる。底泥の流動曲線は、種々の測定条件で得られたものが、そのつど真の流動特性を示していると考えられる。そのため底泥の流動特性を考察したり、測定値について議論する際には、測定条件や方法、すな

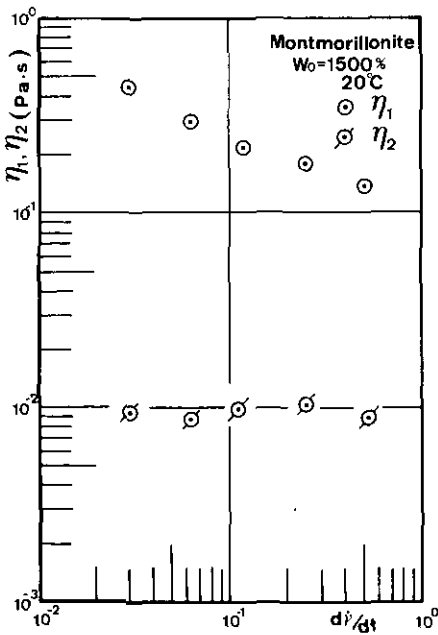


図 5-19 粘度  $\eta_1, \eta_2$  に及ぼすずり速度変化率の影響  
Fig. 5-19 Effects of changing rates of the strain velocity on the viscosity  $\eta_1$  and  $\eta_2$

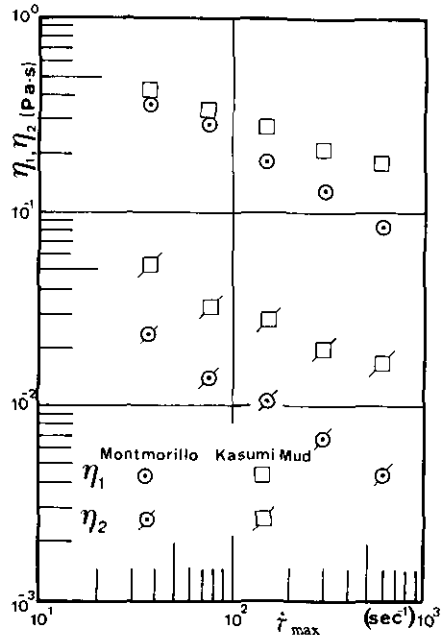


図 5-20 粘度  $\eta_1, \eta_2$  に及ぼす最大ずり速度の影響  
Fig. 5-20 Effects of the maximum strain velocity on the viscosity  $\eta_1$  and  $\eta_2$

わち、測定装置は何であるか、ひずみ制御か応力制御か、ずり速度が連続可変か否か、ずり速度の変化率、最大ずり速度はいくらか等を明記し、できれば統一する必要がある。

今回の測定条件は、底泥粒子の沈降の影響や、ずり速度の急速増加の非定常効果等を考慮して、表5-1の条件を採用した。

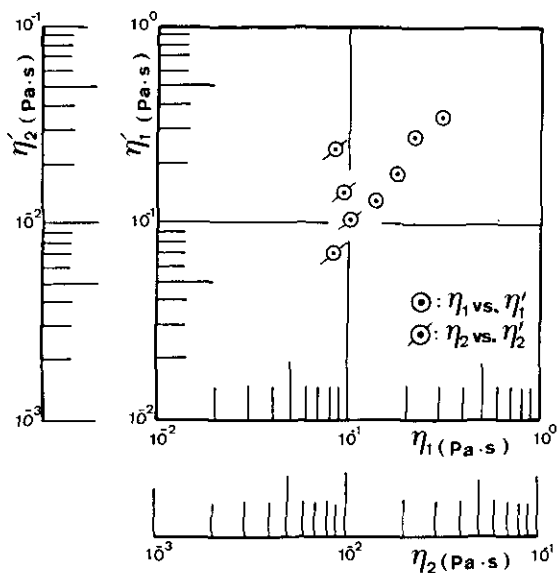


図 5-21 ずり速度は等しく、最大ずり速度が異なる測定条件での粘度の比較

Fig. 5-21 Comparison of the viscosity  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  on the condition that the changing ratio of the strain velocity is the same but the maximum strain velocity is not the same.

## 第 5.5 節 底泥の粘度と降伏値

### 5.5.1 底泥の粘度

比較的高濃度の懸濁液の粘度式としては、森・乙竹の半理論式<sup>14)</sup>がある。これは、粒子表面間距離という概念を用い粒子中心間に働くせん断応力（懸濁液全体の粘度が関与する）と、粒子表面間に存在する容媒に働くせん断応力（容媒の粘度のみが関与する）が、近似的に等しくなるとして求められたものである。

$$\eta_r = 1 + \frac{d_m S_r}{2} \frac{1}{\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\varphi_c}} \quad (5-21)$$

ここに、 $d_m$ は平均粒径、 $S_r$ は単位体積当りの粒子の比表面積、 $\varphi$ は容積濃度、 $\varphi_c$ は連続的かつ安定なせん断変形を与える限界の最高容積濃度である。球形粒子では、容積比表面積、平均径を

取れば、粒子径分布に関係なく、 $1/2 d_m S_r = 3$ となる。また、等径球粒子の最疎充填を最高容積濃度  $\varphi_c$  とすれば、 $\varphi_c = 0.52$  となる。これらの数値を (5-21) に代入すれば

$$\eta_r = 1 + \frac{3}{1/\varphi_c - 1/0.52} \quad (5-22)$$

となる。森・乙竹は式 (5-22) が、等径球粒子懸濁液について実験結果とよく一致するとした。粒径分布が存在すると、 $\varphi_c$  の値が変化したが、これは、 $1/\eta_{sp}(\eta_{sp} = \eta_r - 1)$  と  $1/\varphi$  のグラフを描き、 $1/\varphi$  軸の交点から実験的に求めることができるとした。 $\varphi_c$  はニュートン流動を呈する最高濃度と考えられ、森・乙竹の半理論式は、本来、ニュートン流体に適用できるものである。

土壌懸濁液の粘度についても、ニュートン流動を呈した濃度条件で、式 (5-21) が適合することが、須藤ら<sup>10), 11)</sup>によって報告されている。 $\varphi_c$  としては、近似的には沈降体積濃度  $\varphi_0$  があてられるとしている<sup>11)</sup>。しかし、 $\varphi_0$  は第4節で述べたように初期含水比や初期高さによって変化する値であり、この点に疑問が残る。

大垣ら<sup>9)</sup>は  $\varphi_c$  としては 0.524 で一定と仮定し、 $\varphi$  の値にみかけの体積分率  $\varphi'$  を用いた。 $\varphi'$  は沈降圧密によって粒子が占める体積が等径球粒子の最疎充填構造になっていると仮定して、試料の最終沈降体積率  $\varphi_\infty$  の 0.524 倍で定義され、流動現象における有効体積濃度と見なして導入された概念である。その結果、ビンガム流体の粘度に対しても、式 (5-22) が適合されるとした。

森・乙竹の実験結果からも、常に  $\varphi_c = 0.524$  という仮定は不自然であるし、 $\varphi'$  を求める際の仮定も根拠がない。また最終沈降体積率  $\varphi_\infty$  も初期高さによって若干変化する。それにもかかわらず、大垣らによる整理結果は、工学上十分有効なものである。また、図4-7、図4-8の  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  と  $H_\infty/H_0 (= \varphi_\infty)$  の関係も、結局、大垣らの関係と同じことであり、高濃度懸濁液も含めて、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  が、 $\varphi_\infty$  によって、底泥によらず一義的に決定されることになる。

### 5.5.2 底泥の降伏値

土壌ペーストの降伏値に関しては、須藤・安富<sup>11)</sup>の実験式がある。

$$\tau_y = A_y \exp(\varphi - \varphi_c) \quad (5-23)$$

ここで、 $A_y$  は物質的にによって決まる定数、 $\varphi_0$  は式 (5-21) の  $\varphi_c$  と同じ限界体積濃度。須藤らの降伏値は今回の  $\tau_{y1}$  に対応することは、図5-8で示した。 $A_y$  が普遍定数でないので、 $\tau_y$  は  $\varphi$  によって一義的に決まらない。

大垣らは、 $\tau_y$  は  $\varphi'$  ではなく、懸濁体の乾燥重量  $W_s$  によって一義的に決まるとした<sup>9)</sup>。 $W_s$  は土粒子の密度  $\sigma$  が同じであれば含水比  $w$  と 1 対 1 に対応するので、この結論は、 $\tau_y$  は底泥によらず初期含水比  $w_0$  のみによって決まるということである。大垣らの求めた  $\tau_y$  は、ビンガム降伏値で、今回の  $\tau_{y2}$  に対応するが、今回の実験では  $\tau_y$  は  $w_0$  が同一でも底泥によって異なる結果となった。また、Michaels *et al.*<sup>15), 16)</sup> もビンガム降伏値と最終沈降体積比との間に物質によらず一義的な関係

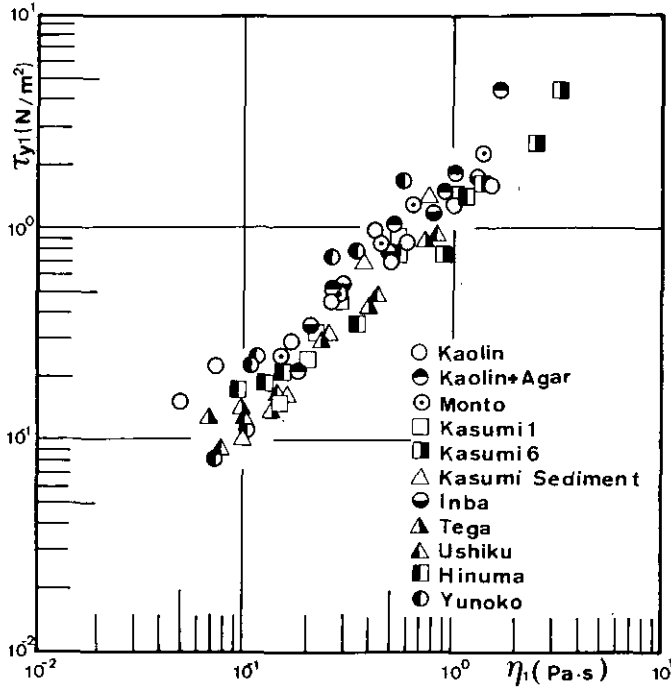


図 5-22 粘度  $\eta_1$  と降伏値  $\tau_{y1}$  の関係

Fig. 5-22 Relationships between the viscosity  $\eta_1$  and the yield value  $\tau_{y1}$

を得ており、大垣らの結果とは異なる。

図 5-22 は、 $\tau_{y1}$  と  $\eta_1$  を示したものである。若干のバラツキはあるものの、

$$\tau_{y1} \propto \eta_1^{0.9} \quad (\alpha_f \doteq 0.93) \quad (5-24)$$

の関係が認められる。図 4-7 で  $\eta_1$  が  $\varphi_\infty$  と一義的な関係が認められたが、 $\tau_{y1}$  も底泥によらず  $\varphi_\infty$  と一義的な関係があることになる。Michaels *et al.*<sup>16)</sup> も、堆積構造が同種の物質であれば、物質によらず  $\tau_{y1}$  と  $\varphi_\infty$  に一定の関係を得ている。

以上に述べた事柄から、底泥の流動特性を代表する粘度と降伏値には、密接な関係があり、両者の発生機構は同じものと考えられる。 $\tau_{y1}$  と  $\eta_1$  が、ともに  $\varphi_\infty$  と結びつくというこの実験事実は、 $\varphi_\infty$  が懸濁液中の粒子の有効濃度、換言すれば自由水の割合の指標であり、 $\varphi_\infty$  が等しい場合に、底泥の種類、粒度分布、粒子形状、比重、etc. に左右されず、同一の粘度や降伏値を持つものと考えられる。

$\varphi_\infty$ 、 $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$  の諸量は、第 2 章や第 4 章で述べた粘土鉱物の性質、有機物や膠結物質による結合

作用, 吸着陽イオンの種類や濃度, 粒子レベルの吸引・反発作用などが相互に複雑に影響し合った結果, マクロ的な性質として派生したものであり, これらの力を理論的に導くことは現状では不可能である。

表 5-3 吸着陽イオンによるコンシステンシー指数の変化<sup>17)</sup>  
 Table 5-3 Change of the consistency index caused by the adsorbed cation<sup>17)</sup>

試料の種類	塑性限界	液性限界	備考
カオリナイト-Na	26	52	White, 1964
-Ca	36	73	"
イライト-Na	34	61	"
-Ca	40	90	"
モンモリロナイト-Na	97	700	"
-Ca	63	177	"
アロフェン			
-生土	136	231	Birrell, 1952
-風乾	78	85	"
Na-モンモリロナイト			
-水	-	950	Warkentin, 1961
-0.01N NaCl	-	870	"
-1.0N NaCl	-	350	"
Ca-モンモリロナイト			
-水	-	360	"
-1.0N CaCl <sub>2</sub>	-	310	"
カオリナイト pH4			
-水	-	54	"
-0.01N CaCl <sub>2</sub>	-	46	"
-1.0N CaCl <sub>2</sub>	-	39	"
Na-カオリナイト pH10			
-水	-	36	"
-0.01N NaCl	-	34	"
-1.0N NaCl	-	40	"
アタパルジャイト	145	171	"
ハロイサイト	65	94	"

1. Grim (1954)

第5.6節 他の物性量との関連

今回の実験によって, 底泥の流動曲線は A~E の五つの type に分類されたが, 流送実験を行った含水比条件では, Type A, Type B に大別された。流動曲線による底泥の分類が, 沈降形態における分類と一致した。さらに, 吸着陽イオンの置換により, 沈降形態が変化すれば, それに応じて流動曲線も変化することもわかった。以上のことから, 流動特性と沈降特性を支配する因子が同じものと推察される。また液性限界値も, 両者とかなり高い相関が認められた。含水比が同じ条件では, 液性限界  $w_L$  が高い底泥ほど,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\tau_{y1}$ ,  $\tau_{y2}$  も大きくなり,  $\phi_\infty$  も大きい傾向がある。また, 表 5-3<sup>17)</sup> は吸着陽イオンによるコンシステンシーの変化を示したものであるが, カオリナイトの場合は,  $Ca^{2+} - Kaolinite > Na^+ - Kaolinite$  となっているが, モンモリロナイトの場合は

$\text{Na}^+$ -Montmorillonite >  $\text{Ca}^{2+}$ -Montmorillonite となる。これらは、図 5-10、図 5-11 の粘度の結果とよく対応する。

一方、今回の実験範囲では、粒度構成の影響は顕著に現れなかった。これは、対象とした底泥の粒子が、ほとんど粘土とシルトによる構成であったことも一因であろう。しかし、今回の結果は、この粒径範囲の底泥では、表面力を支配する因子が流動特性に大きな影響力をもつことを間接的に裏付けていると考えられる。

## 第 5.7 節 結 論

本章では、底泥の流動特性について、主に実験的研究を示した。底泥はチクソトロピックな物質であるので、微小ずり速度領域からの連続的な流動曲線が必要である。底泥の流動曲線にも、沈降形態のグループ分けに呼応して、二つの異なった型が現れた。第一底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値の存在と、流動曲線の急激な折れ曲りである。この流動曲線においては、ずり速度の微小な範囲で降伏値  $\tau_{y1}$  と粘度  $\eta_1$  を定義した。第二底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値がなく、流動曲線にベキ乗則が成立することである。この場合には、ずり速度の微小な範囲で便宜的に  $\eta$  を定義した。粘度や降伏値は、液性限界値が高い底泥ほど、同一含水比での値は大きくなる傾向がある。また、吸着陽イオンの置換により、沈降形態の変化に呼応して流動曲線も変化した。今回の含水比の条件の範囲内では、底泥の粘度には水の粘性の影響はないこと、さらに  $5^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$  の泥温の変化の影響も現れなかった。底泥のチクソトロピックな現象についても検討した。ずり速度の小さい領域で求めた粘度  $\eta_1$  は、ずり速度の変化率の増加により低下するが、最大ずり速度には影響されない。一方、ずり速度の大きな領域において求めた粘度  $\eta_2$  は、ずり速度の変化率による影響はないが、最大ずり速度の増加に伴い低下することが明らかとなった。この章の最後では、粘度 ( $\eta$ ) と降伏値 ( $\tau_{y1}$ ) と最終沈降体積比の間の関係を検討し、実験的には、最終沈降体積比を知ることにより、粘度と降伏値を規定できることを示した。この実験事実に対する理論的解析は、現状では不可能であるが、定性的に次のように考えられる。最終沈降体積比は、懸濁液中の粒子間力の影響範囲を示すとも考えられる粒子の有効体積分率の指標であり、この値が等しい場合に、底泥の種類や粒度、形状、比重等に左右されることはなく、同一の流動特性を呈する。

## 参 考 文 献

- 1) 須藤清次・安富六郎 (1963): 土壌のレオロジー. 日本土壌肥科学雑誌, 34 (8), 296-308.
- 2) 須藤清次・安富六郎 (1965): 土壌コロイドのレオロジー的構造—(I)—, 農業土木学会論文集, No. 14, 16-20.



- 3) 須藤清次・東山勇・山崎不二夫 (1965) : 固い土の力学的性質—土のレオロジー的構造 (II) —, 農業土木学会論文集, No. 14, 21-26.
- 4) 東山勇・須藤清次 (1965) : 力の力学的転移点—土のレオロジー的構造 (III) —, 農業土木学会論文集, No. 14, 27-31.
- 5) 須藤清次・東山勇・安富六郎 (1965) : 土の強度について—土のレオロジー的構造 (IV) —, 農業土木学会論文集, No. 14, 60-66.
- 6) 足立忠司・竹中肇 (1973) : ヒズミ速度効果ならびに土壤水分からみた粘性土の工学的性質. 農業土木学会論文集, No. 43, 26-32.
- 7) 岡 小天 (1974) : 物理学選書7 レオロジー. 裳華房.
- 8) 大坪国順・村岡浩爾 (1981) : 底泥の物性と限界掃流力の関連について. 第25回水理講演会論文集, 73-78.
- 9) 大垣真一郎・松尾友矩 (1937) : 高濃度懸濁液の流動特性について. 土木学会論文報告集, 第210号, 21-32.
- 10) 須藤清次・安富六郎 (1961) : 土壤ペーストの流動 (I). 農業土木研究別冊, 第2号, 71-74.
- 11) 安富六郎・須藤清次 (1962) : 土壤ペーストの流動 (II). 農業土木研究別冊, 第3号, 41-45.
- 12) Workentin, B. P and Yong R. N. (1962) : Shear strength of montmorillonite and halosite related to interparticle forces. *Clays Miner.*, 9, 210-218.
- 13) 岩熊敏夫 (1981) : 霞ヶ浦高浜入における底泥温度の年変動と熱収支. 国立公害研究所研究報告, 第22号, 55-61.
- 14) 森芳郎・乙竹直 (1956) : 懸濁液の粘度について. *化学工学*, 20(9), 16-22.
- 15) Michaels, A. S. and Bogler J. C. B. (1962) : Settling rates and sediment volumes of flocculated kaolinite suspensions. *I & E C Fundamentals*, 1 (1), 24-33.
- 16) Michaels, A. S. and Bogler J. C. B. (1962) : The plastic flow behavior of flocculated kaolin suspensions. *I & EC Fundamentals*, 1 (3), 153-162.
- 17) Yong, R. N. and B. P. Workentin (山内豊聡・竹中肇・東山勇・前田隆 監訳) (1978) : 新編 土質工学の基礎. 鹿島出版会.

## 第6章 底泥の流送に関する既往の研究

### 第6.1節 概説

粘着性土の流送現象は、粘着性土表面に作用する流体力と、粘着性土の移動抵抗力の競合現象としてとらえられる。粘着性土の流送特性の最大の特徴は、移動抵抗力が表面力に起因していることである。これは、粘着性土の場合、個々の土粒子径が微細であるため、重力抵抗より、コロイドの性質からくる表面力が支配的になることによる。表面力はここでは粘着力と換言されるもので、その成因は第2章に述べたように、電気化学的、化学的および物理学的な粒子間力である。そのため流送特性においても、沈降特性や流動特性の場合と同様、交換性陽イオン・有機物量・含水比等の影響を大きく受ける。特に、含水比の影響は大きく、同一粘着性土においても、不飽和の場合には不飽和度によって全く逆の性質を示す<sup>11,2)</sup>。

粘着性土の流送に関する研究は、水理学的立場と農学・土壌学的立場から始まった。前者は、運河の安定河道の問題であり、後者は土壌の侵食の問題であった。前者は、粘着性土の流送に関する限界流速や限界掃流力を、土の力学的特性すなわちベーンせん断強さ\*、一軸圧縮強さ、コンシステンシー指数等で関連づけようとする方向に研究が進んだ。後者は、土壌の分散比や粘土含有率と耐侵食性との関係、交換性陽イオンや電解質の種類と侵食速度との関係が研究テーマとなった。「Erosion of Cohesive Sediments」と銘打ったアメリカ土木学会のTask Committee<sup>3)</sup>の報告書が出た1968年以前の研究は、ほとんどの研究が上記のようなものであった。しかし、Task Committeeが報告書の中で述べているように、粘着性土のerosion resistanceを支配する特性が十分に明らかにされたとは言い難い。

一方、1961年にEinstein & Krone<sup>4)</sup>によって、エスチャリにおける泥の輸送特性に関する研究が発表されたのを発端に、1965年以降は研究の対象が底泥に移行した。それまでは、含水比の低い固い粘着性土が対象であった。また、この頃から流送特性を支配する因子として、含水比が取り入れられるようになってきた。研究の内容も、底泥の限界掃流力に関するものほかに、エスチャリにおける非定常流れによる底泥の沈降・再浮上現象に関するものが増え、現地観測や濁度の時間変化に関する数値シミュレーションなどの研究も行なわれるようになった。しかし、底泥の限界掃流力を統一的に求めた論文としては、Mignotの研究<sup>5)</sup>しかなく、飛び出し量もしくは侵食速度とせん断応力との関係式は、研究対象とした個々の底泥に対しては求め得ても、統一的なものを提示したものは1編もないのが現状である。

\* ベーンと呼ばれる互いに直交する4枚の羽根を試料中に押し込み、回転モーメントで土を円筒面でせん断させた場合のせん断強度

## 第 6.2 節 粘着性土の流送に対する主な既往の研究

1968 年以前に粘着性土の侵食・流送に関する主な研究と成果は、前述の Task Committee<sup>3)</sup>の報告書にまとめられている。そのうち主なものを紹介すると次のようである。

i) Fortier, S. & Scobey, F. C.<sup>6)</sup> 運河の河道安定のための許容平均流速（水深 1 m 以下）を河床構成材ごとに与えた。

ii) Dunn, I. S.<sup>7)</sup> critical shear force  $\tau_c$  を vane shear strength  $S_v$  と関係づけた

$$\tau_c = 0.02 + \frac{S_v \tan \theta}{1000} + 0.18 \tan \theta \quad (\text{lb/ft}^2) \quad (6-1)$$

ここで  $\theta$  は Dunn によって得られた式 (6-1) の直線の勾配。

iii) Smerdon, E. T. & Beasley, R. P.<sup>8)</sup>  $\tau_c$  を塑性指数  $I_p^*$  と関係づけた。

$$\tau_c = 0.0034 (I_p)^{0.84} \quad (\text{lb/ft}^2) \quad (6-2)$$

iv) Karasev, I. F.<sup>9)</sup> ソビエト連邦の粘着性土の流送に関する研究を紹介した。また 1 km という長大な開水路を用いて、sandy loam の移動初期から流動過程における粒子の大きさ、形態を調べた。その結果、粒子は個々の粒子としてではなく、粒子塊として移動することを見出した。

v) Moore and Masch<sup>10)</sup> 垂直にしても自重で破壊を起こさないような固い粘着性土用に、回転円筒式限界掃流力測定器を考案して、 $\tau_c$  を測定した。そしてこの値をもとに、垂直噴流による粘着性土の洗掘速度の無次元表示を試みた。

vi) 農学・土壌学関係の研究としては次のようなものがある。Middleton<sup>11)</sup> は斜面侵食に関連して、侵食性は土壌の分散比や、彼自身の定義による侵食率 (erosion rate) と、深い関係があるとした。Anderson<sup>12)</sup> も、土壌の侵食性は分散比でよく表示できるとした。Winterkorn<sup>1)</sup> は乾燥土壌の侵食性を検討し、土粒子の吸水力や吸水量が支配的要素であることを見出した。Grissinger<sup>2)</sup> も侵食性に対する先行含水比の効果を検討した。その結果、不飽和な状態では、ある含水比までは含水比が高いほど耐侵食性が大きく、それ以上の含水比からは含水比の増加につれて耐侵食性が低下することを見出し、その臨界含水比は粘土の種類や構成比によって異なることを明らかにした。Wallis et al.<sup>13)</sup> は耐侵食性の代表因子として分散比を取り上げ、それに及ぼす交換性陽イオンの影響を検討した。また、Ormsby .et al.<sup>14)</sup> はカオリナイト粘土の水分中の湿潤剤 (wetting agent) が、粘土の変形強度、沈降体積比、透水性に及ぼす効果を検討し、陽イオンと陰イオンで逆の効果をもたらすことを明らかにした。

i) ~ vi) に紹介した研究は、全てが含水比が低い状態の粘着性土の侵食性に関するものであり、限界掃流力はせん断破壊強さに比して非常に小さな値となることが共通した結果である。また、

\* 3.1.4 参照のこと

ほとんどの研究が含水比の侵食性への影響を考慮してない。これらの研究成果は、底泥の流送特性の解明に直接利用はできないが、侵食性と土壌の物性との関係に対する知見は、底泥の流送を考察する際に大きな示唆を与えるものである。

1968年以降の、低含水比粘着性土に対する研究は、Raudkive *et al.*<sup>15)</sup>の erosion rate に及ぼす塩分濃度、温度、 $\zeta$  電位、陽イオン交換容量の影響を検討したもの、Allen<sup>16)</sup>の粘土河床における流れ方向に観察された rectangular groove や meandering groove についての研究がある。澤井<sup>17)</sup>は、2次元等流条件下で、液性限界以下の低含水比について、含水比条件を変えてベントナイトの限界掃流力や侵食速度を求めた。吸着陽イオンの種類は明らかではないがコンシステンシー指数や粒度から推察すると、 $\text{Ca}^{2+}$ -モンモリロナイト（酸性白土）と思われる。液性限界以下での低含水比粘土の侵食機構は、粘土層内部は全く移動しないのに、界面から微細粒子がわずかに巻き上がるというもので、これは界面のごく近傍で含水比が急激に変化する層が存在しその層内の微細粒子が飛び出すものと考えられる。

底泥を対象とした流送特性に関する本格的な研究は、Partheniades<sup>18)</sup>より始まった。Partheniades は、サンフランシスコ湾で採取した泥について、せん断応力と底泥の浮遊濃度との関係を実験的に検討した。底泥の含水比は 120%（液性限界：110%）で比較的締まった状態のものである。浮遊濃度が急激に高くなるせん断応力を、限界掃流力と定義した。その値は、 $0.48 \sim 1.39 \text{ N/m}^2$ である。また、実験結果より、浮遊していた底泥が沈降して再浮上しない限界のせん断応力は、限界掃流力より小さいことを見出した。さらに巻き上げ率  $P_m$  (erosion rate  $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ ) とせん断応力との関係を実験的に求め、 $P_m \propto (\tau - \tau_p)$  を得た。さらに飛び出し量について理論的考察も加えた<sup>18), 19)</sup>。ここで  $\tau_p$  は  $\tau > \tau_c$  における、 $P_m$  と  $\tau$  の関係を直線近似としたとき、 $P_m = 0$  となる  $\tau$  の値であり、 $\tau_p < \tau_c$  である。しかしそこで得られた限界掃流力や飛び出し量とせん断応力との関係はその実験条件のみに適用できるものであり、一般的なものではない。底泥の限界掃流力に関する一般的表示は、Mignot<sup>9)</sup>によって初めてなされた。Mignot は底泥の沈降特性、流動特性、流送限界、斜面安定角などについて精力的な実験を行なった。その結果、底泥について多くの知見を得たが、その一つに限界掃流力と降伏値との関係がある。詳しくは後述するが、種々の底泥の幅広い含水比条件において両者の関係を求めている。Hollick<sup>20)</sup>も限界掃流力を求める装置、手法について検討を加え、鉛直噴流における Jet レイノルズ数と限界掃流力との関係を見出したが、その関係は底泥により異なり、物性との関連も反映できていない。Mignot は、底泥の物性を降伏値で代表させたわけであるが、降伏値と土壌の物性との関連には未解明な部分が多い。そのため、Mignot の結果は、工学的には十分有効なものであるにもかかわらず、一部の研究者に引用され<sup>21), 22)</sup>、今後の限界掃流力の研究に対する方向を示すものだという評価<sup>23)</sup>を得たにとどまり、砂粒の移動限界における Shields Curve のような地位は得られなかった。彼の研究成果では、限界掃流力が見かけ密度のべき乗に比例するという関係がより注目された。しかしこの場合、その比例定数が底泥により異なり限界掃流力は一義的に表わされない。そのため Mignot の研究は底泥の限界掃流力を規定するものとして広く注目されることがなかった。

近年、水質環境保全の立場から、底泥の巻き上がりによる水質汚染が問題となり、底泥の流送に関する研究が活発になり、再び底泥の限界掃流力に関する研究がなされた。栗谷ら<sup>24)</sup>は、限界掃流力に及ぼす含水比と粒度構成の影響や、底泥河床の抵抗係数などを実験的に検討した。その結果、底泥の限界掃流力は砂粒公式では評価できないことを示した。細井ら<sup>25)</sup>は、底泥の限界掃流力は堆積時間に大きく支配されるとし、その状態を代表する量として見かけ粘度と見かけ密度を用いて、次元解析的手法により限界掃流力の定式化を試みた。しかし、両者の研究とも、底泥の限界掃流力に対する一般的な関係を得るまでに到らなかった。

1965年のPartheniades<sup>18)</sup>の実験以来、浮遊濃度に関する研究も多い。Partheniades *et al.*<sup>25)</sup> Mehta *et al.*<sup>27), 28)</sup>の一連の研究は、特殊な円形循環水路を用いて、微細粒子や底泥の沈降、再浮上過程の実験を行なった。初期状態に $C_0$ なる浮遊濃度で流し、その後せん断応力を低下させ、その条件での平衡濃度 $C_\infty$ を求め、 $C_\infty/C_0$ とせん断応力との間に一定の関係があることを見出した。楠田ら<sup>29)</sup>、海田ら<sup>30)</sup>、楠田ら<sup>31)</sup>の一連の研究も、Partheniadesと同じ円形循環水路を用いた底泥の沈降、再浮上過程の実験的研究である。Mehta *et al.*<sup>27)</sup>の結果を確認し、この原因を底泥粒子の粒度分布に求めた。即ち、初期条件におけるせん断応力 $\tau_0$ では、全ての粒径の粒子は沈降しないで水中に浮遊し、 $\tau (< \tau_0)$ になるとある粒径の粒子は沈降した後再浮上しないと考えた。そして $C_\infty/C_0$ は $\tau$ で沈降しない粒径粒子の全粒子に対する割合を示すとした。またせん断応力を増加させてゆく実験では、通水後の河床表面の粒度分布の結果より、表層で粗粒化が起きていると判定した。さらに流れを周期的に変化させた実験を行なって、底泥の沈降、再浮上の過程を詳しく検討した。これらの研究は、結果の解釈には多少の異論はあっても、現象論的に非常に興味あるものである。実験を行なった条件に対して、巻き上げ率とせん断力に対して

$$P_m = 0.036 (\tau / \tau_c - 1)^{1.7} \quad (\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})) \quad (6-3)$$

なる結果も得ている。馬場ら<sup>32)</sup>は、二つの直線区間を半円形水路で連結した環流水路を用いて現地泥の流送実験を行った。その結果、底泥の限界掃流力としては、河床から底泥が巻き上がり水中でcloudyとして観察される状態としての限界掃流力(第一限界掃流力)と、continuous erosionが起る限界(第二限界掃流力 or 洗掘限界掃流力)が考えられるとした。しかし両限界の差を説明する力学的指標は不明であるとし、両限界を実験的に規定するまでには到らなかった。流送過程においても、decreasing erosion rateなる現象を見出し、底泥河床の粗粒化に初めて注目している。馬場らの実験結果は、底泥の流送現象を考察するにあたり多くの示唆的内容を持っているが、結果の整理法や解釈の上で若干の突込み不足の感がいなめない。村岡<sup>33)</sup>は都市河川での底泥の流送の現地観測と室内実験を行ない、対象とした底泥に対して限界掃流力として、水路実験から

$$\tau_c / \rho = 2 \sim 5 \quad (\text{cm}^2 / \text{s}^2) \quad (6-4)$$

巻き上げ率として、現地観測結果から

$$P_m = 2.7 \times 10^{-9} \{10(u_* - 1.41)\}^{1.2-1.5} \quad (\text{ton}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})) \quad (6-5)$$

を得ている。

Partheniades<sup>18)</sup>以後の上記の一連の研究は、現象論的には非常に興味深いものが多いが、その結果は一般性に欠ける。底泥の流送に関する研究をさらに発展させるためには、限界掃流力と巻き上げ量の基本量を、明確に規定し定式化することが急務であると考えられる。それがなされて初めて、次に述べる野外観測での結果の整理、解釈さらには予測に対する合理的研究が可能となると思われる。

底泥の流送に関する野外観測も1967年以降<sup>34)</sup>増えてきた。村岡<sup>33)</sup>の都市河川での濁度の時間的变化、鉛直分布の観測結果は、水理量との対応関係もよく、野外観測としては高いレベルのものである。Thorn<sup>35)</sup>は、現地観測用の光透過式濁度計を開発し、英国3河川で濁度の長期および短期観測の可能性を検討した。Foss *et al.*<sup>36)</sup>はMaryland州のEastern Shoreにおけるレス(loess:黄土)の堆積特性を調査した。Silverberg *et al.*<sup>37)</sup>はセントローレンス川のエスチャリにおいて潮位、塩分濃度、濁度の、時間変化と鉛直分布を判定した。Sheng *et al.*<sup>38)</sup>は、エリー湖における、風による吹送流と濁度の時空間変化を飛行機を用いて大規模に観測し、さらに、エリー湖泥に対して実験的に求めた飛び出し量とせん断応力の関係を用いて、濁度の数値シミュレーションを行なった。Shengらの研究は、流れやせん断応力の表現に大胆な仮定はあるものの、底泥流送問題の今後の研究の方向を示唆する興味深いものである。河原ら<sup>39)</sup>は都市河川における、底泥の粒度分布と灼熱減量比の流下方向の変化を調査した。また底泥の浮遊濃度とCOD、BODとの関係を検討した。エスチャリにおいては、河床の底泥の状態も、浮遊濃度などの水中での特性量も、その地点その時刻のみの水理量だけでは規定できず、過去における水理量の履歴、上流域の底泥の流送特性が、複雑に影響している。流れも不等流でかつ非定常なものであり、粒子の凝集の問題もある。これらの理由により、現地観測の研究の多くは現況報告の域を出ていない。

### 第6.3節 結論

本章では、底泥を含めた粘着性土の流送に関する既往の研究を紹介した。アメリカ土木学会のTask Committee<sup>3)</sup>の報告が出されるまでの研究は、ほとんどが液性限界値に近い含水比状態の流送抵抗力に関するもので、含水比に対する考察が欠如している。1960年代後半のPartheniades<sup>18)</sup>やMignot<sup>9)</sup>の研究から、対象が底泥に移り、含水比の効果が検討されるようになり、底泥の沈降、再浮上に関する現象論的研究が多くなった。1970年後半には、環境に対する関心の高まりから、底泥の流送に関する研究が活発になり、今日に到っている。流送特性に対する個々の研究は現象論的には興味深いものが多いが、流送特性の基本量である限界掃流力や飛び出し量を、実験的にも理論的にも定式化した研究はほとんどない。

## 参 考 文 献

- 1) Winterkorn, H. F. (1972) : Mechanism of water attack on dry cohesive soil systems. *Soil Science*, **54**, 259-273.
- 2) Grissinger, E. H. (1966) : Resistance of selected clay systems to erosion by water. *Water Resources Res.*, **2**, 131-138.
- 3) Task Committee (1968) : Erosion of cohesive sediments, *Proc. A. S. C. E.*, **94**, HY4, 1017-1049.
- 4) Einstein, H. A. and R. B. Krone (1961) : Estuarial sediment transport patterns. *Proc. A. S. C. E.*, **87**, HY2, 51-59.
- 5) Mignot, P. C. (1968) : Étudo des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques. *Houille Blanche*, **23**(7), 591-626.
- 6) Fortier, S. and F. C. Scobey (1926) : Permissible canal velocities. *Trans. A. S. C. E.*, **88**, 940-984.
- 7) Dunn, I. S. (1959) : Tractive resistance of cohesive channels. *Proc. A. S. C. E.*, **85**, SM3, 1-24.
- 8) Smerdon, E. T. and R. P. Beasley (1961) : Critical tractive forces in cohesive soils. *Agric. Engng.* **42**, 26-29.
- 9) Krasev, I. F. (1964) : The regimes of eroding channels in cohesive material. *Soviet Hydrology : Selected Papers (Transl. Am. Geophys. Union)*, **6**, 551-579.
- 10) Moore, W. L. and F. D. Masch (1962) : Shear strength and consolidation characteristics of calcium and magnesium illite. *Clays and Clay Minerals, Publication 456*, 251-272.
- 11) Middleton, H. E. (1930) : Properties of soil which influence soil erosion. *Technical Bulletin No. 178 USDA, Washington, D. C.*, 1-16.
- 12) Anderson, H. W. (1951) : Physical characteristics of soil related to erosion. *Journal of Soil and Water Conservation*, July, 129-133.
- 13) Wallis, J. R. and C. J. Stevan (1961) : Erodibility of some California wildland soils related their metallic cation exchange capacity. *Jour. Geophysics Res.* **66**, 1225-1230.
- 14) Ormsby, W. C., R. M. Witucki and W. A. Weyl (1956) : Effect of wetting agents on the deformation behavior of kaolinite water systems. *Clays and Clay Minerals*, **456**, 251-272.
- 15) Raudkivi, A. J. and D. L. Hutchison (1974) : Erosion of kaolinite clay by flowing water. *Proc. R. Soc. Lond. A.* **337**, 537-554.
- 16) Allen, J. R. L. (1969) : Erosional current marks of weakly cohesive mud beds. *J. Sediment. Petrol.* **39** (2), 607-623.
- 17) 澤井健二 (1977) : 粘性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究. 京都大学学位論文.
- 18) Partheniades, E. (1965) : Erosion and deposition of cohesive soils. *Proc. A. S. C. E.* **91**, HY1, 105-139.

- 19) Partheniades, E, and R. E. Paaswell (1970) : Erodibility of channels with cohesive boundary. Proc. A. S. C. E. **96**, HY3, 753-771.
- 20) Hollick, M. (1976) : Towards a routine test for the assessment of the critical tractive forces of cohesive soils. Trans. A. S. C. E. **19**, 6, 1076-1081.
- 21) Bellessort, B. (1973) : Movement of suspended sediments in estuaries - flocculation and rate of removal of muddy sediment- . Int. At Energy Agency Tech-Report, **145**, 31-40.
- 22) Lanbermont, J. and G. Lebon (1977). Erosion of cohesive soils. Jour. Hydraulic Res., **16**, 1, 27-44.
- 23) Raudkivi, A. J. (1976) : Loose Boundary Hydraulics 2nd Edition. Pergamon Press, 262-281.
- 24) 栗谷陽一・楠田哲也・海田輝之 (1979) : 底泥の巻き上げに関する基礎的研究. 第15回衛生工学研究討論会論文集, 21-27.
- 25) 細井由彦・住友恒・岩井重久 (1979) : 底泥の巻き上げに関する実験的研究(II). 第15回衛生工学研究討論会論文集, 28-33.
- 26) Partheniades, E. and J. F. Kennedy (1966) : Depositional behavior of fine sediment in a turbulent fluid motion. Proceedings Int. Conf. Coastal Engineering, 10th, 707-729.
- 27) Mehta, A. J. and E. Partheniades (1974) : On the depositional properties of estuarine sediments. Proc. Int. Conf. Coastal Engineering, 14th, 1232-1251.
- 28) Mehta, A. J. (1975) : An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. Jour. of Hydraulic Research, **13**, 4, 361-381.
- 29) 楠田哲也・海田輝之 (1980) : 底泥の巻き上げと沈降. 国立公害研究所調査報告, 第16号, 78-93.
- 30) 海田輝之・楠田哲也・栗谷陽一・則松秀晴 (1981) : 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究. 第17回衛生工学研究討論会論文集, 42-48.
- 31) 楠田哲也・海田輝之・栗谷陽一・石原達弘 (1982) : 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究 (II). 第18回衛生工学研究討論会論文集, 152-158.
- 32) 馬場洋二・佐々木重義・伊藤雄二 (1974) : ヘドロ河床の流れによる洗掘特性. 土木技術資料, **16**, 10, 28-33.
- 33) 村岡浩爾 (1974) : 流れによる底泥浮上と水質との関連. 第18回水理講演会論文集, 181-186.
- 34) Postma, H. (1976) : Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment. In Estuaries. Edited by. G. H. Lauff, American Association for the Advancement of Science, Publication No.83, 158-179.
- 35) Thorn, M. F. C. (1975) : Monitoring silt movement in suspension in a tidal estuary. Proc. Congress. Int. Assoc. Hydraulic Res. 16th, **3**, 596-603.
- 36) Foss, J. E., D. S. Fanning, F. P. Miller, and D. P. Wagner (1978) : Loess deposits of the Eastern Shore of Maryland. Soil Sci. Soc. AM. J., **42**, 329-334.
- 37) Silveberg, N. and B. Sundby (1979) : Observation in the turbidity maximum of the St. Laurence Estuary. CAN. J. EARTH SCI. **16**, 939-950.



- 38) Sheng, Y. P. and W. Lick (1979) : The transport and resuspension of sediments in a shallow lake.  
Jour. of Geophysical Res., 20, April, 1809-1826.
- 39) 河原長美・山岡一三・西原巧 (1982) : 都市河川の底泥および浮泥の水理・水質学特性. 第17回衛生  
工学研究討論会論文集, 34-41.

## 第7章 底泥の流送形態

### 第7.1節 流送実験の目的

底泥の流送に関する研究は、第6.2節で述べたように数多く行われてきたが、流送特性の基本量である底泥の限界掃流力、飛び出し率をとってみても、それらを明確に定量化したものは皆無といっても過言でない。これは底泥が微粒子であり、砂粒のように粒子に作用する力を流体力と重力のみに限定できず、粘着力や凝集力などの表面力が支配的になるためである。底泥は通常水和の状態が存在しているが、水和の程度によって粘着力や凝集力は変化し、底泥の種類によっても異なるために、底泥の粒子間に作用する力を内部機構まで立入って定量的に把握するのは、現状では不可能である。第4.5節に述べた、土粒子周辺の電気ポテンシャルの分布なども単純理想化した状態での理論であり、それらは粒子間の相互作用についてある種の原則を示してはくれるが、定量的には粘着性土の粘着力や凝集力を説明できない。限界掃流力や飛び出し率を問題にする際、土粒子に作用する力の大きさを規定できれば、この問題を静的釣り合いや運動論的に論議できるが、支配的力である表面力の評価が非常に困難であるために、これらの問題に関する研究は、現象論的、個別的研究の範囲に留まざるを得なかった。

研究における実験の位置づけとしては、二つの立場がある。一つは、演繹的に導びかれた理論なり結論を実証する立場、他の一つは、理論や結論を帰納するために必要な事実を実験によって与える立場である。底泥の流送問題に関しては、上記の理由より理論や結論を演繹することは不可能であるので、まず実験によって何らかの事実を得ることに主眼をおかざるを得ない。粒子間の粘着力や凝集力に影響を及ぼす因子は、粘土の種類や構成比から始まり、塩分濃度、交換性陽イオンなど様々のものが考えられ、それらが相互に関連し合っている。そのため全ての因子の影響を逐一評価することは非常に膨大な実験条件となるし、たとえ行なってもその結果から各因子ごとの影響を独立に評価できるとは考えにくい。そのため、これらの諸因子の影響を包括した物性量を見出すことと、その物性量と限界掃流力や飛び出し率との関係を明らかにするのが大きな目的であり、流送実験もその線にそった内容にする必要があった。従来の研究結果から、限界掃流力は底泥の種類(液性限界、塑性指数、分散比などで代表される)のみならず、含水比によっても大きく変化することは明らかである。そのため流送実験では、底泥の種類と含水比を変化させた実験条件を設定した。流送実験は限界掃流力を求める実験と飛び出し率を求める実験に大別される。両者の実験方法・手順には本質的な違いはない。

底泥の流送特性に関しては、流送形態をはじめ何の知識を持っておらず、限界掃流力の判定すらその基準が不明であった。そのため各底泥に対して幅広い含水比の条件で流送実験を行い、流

送形態の特徴と絡み合わせて限界の定義や規準を決め、二つの限界状態を求めていった。そのため限界掃流力に関する実験には試行錯誤的な側面が多分にあった。飛び出し量を求める実験においては、実験する底泥の両限界値がどの程度で、どのような流送形態を呈するのか予想でき、ある程度先を見通した実験ができた。

### 第 7.2 節 流送実験装置<sup>1)</sup>

流送実験に用いた水路は、透明アクリル製の長方形断面（高さ 5 cm × 幅 15 cm）をした管水路である。全長は約 10 m、長方形断面部の長さは 7 m である。長方形断面の上流端から 4.5 m 下流に、長さ 90 cm × 幅 10 cm × 高さ 2 cm の移動床区間がある。固定床面は、底面の表面状態が滑面（平坦床の場合）であることから、アクリル壁のままにした。移動床部の 50 cm 程度下流に、流れを強制的にかく拌させる区間を作り、その約 30 cm 下流に濁度測定区間と採水孔を設けた。管路には、1 m ごとに圧力測定用タップを取りつけた。水の循環系統は、循環方式でも排水方式でも可能であるが、今回の実験においては排水方式を採用し、水路を流下してくる水は清水の条件とした。流量の調整は、水路上下流端に設置されたスルースバルブによる。流量測定は、三角堰及び渦流量計によった。図 7-1 に実験水路の概要を示す。

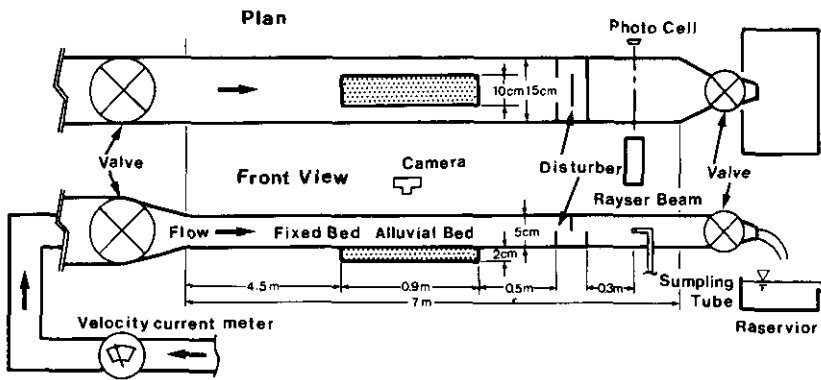


図 7-1 実験用短形断面管路

Fig. 7-1 Pipe conduit with rectangular cross section used in the hydraulic experiments

### 第 7.3 節 実験方法及びその手順

限界掃流力を求める実験においては、底泥の量が限られているために、移動床区間の一部に底泥を敷きつめた。底泥を敷きつめる方法は、二種類ある。一つは、移動床部の中央部の 3 分の 1 を移動床として、その部分にぴったり収まる試料箱を用意し、試料箱に所定の含水比の底泥を充てんし（厚さ 1.5 cm）、その試料箱を水路から出し入れする方法である。試料を水路に入れる際には、

蓋をして、底泥が水と接触する際に起きやすい接触角の違いによる底泥のはがれを防いだ。この方法によれば、水路中に水があっても試料の出し入れ可能であるので、実験準備が迅速化される。しかし、試料箱が長すぎると、出し入れの際に底泥がこぼれ、底泥表面が固定床と同一平面上にならない。他の一つは、移動床幅をちぢめて、長さ90 cm×幅5 cm×高さ1.5 cmとし、水路中の水を全て排除した状態で、所定の含水比の底泥を直接移動床に敷つき固定床面と同一面に仕上げる。その後、微小流量で移動床面を冠水させる。水が移動床上を被う際、表面張力による底泥層のはがれが生じないように十分注意した。はがれが生じた場合は、こてで表面を整理するがはがれの程度が大きい場合はやり直した。この方法は移動床部を長くできる利点があるが、次の実験の通水までにかかなりの時間を浪費するのが欠点である。

予備実験として、バルブの開度と流量・ピエゾ水頭の関係固定床実験において求めた。本実験では決められた速度で、流量、すなわちせん断応力を増加させたが、その操作はバルブのみで行った。予め測定時間とバルブ回転数の関係を与えておき、それに従ってバルブを操作してその時間の目的の水理条件を実現させた。この場合、渦流量計によって流量を連続的に測定して所定の流量を満足しているかを確認した。

底泥の流送形態の観察や写真撮影は、限界掃流力を求める実験の際に行った。流量を漸次増加させて、特徴的な流送形態が現れた時、移動床の直上と側面から写真撮影を行い、その時の流量とピエゾ水頭をチェックした。

本実験において、バルブ操作によるせん断応力の増加の割合は、 $0.025 \text{ (N/m}^2\text{)/min}$  (平均流速にして  $0.01\sim 0.02 \text{ (m/s)/min}$ ) とした。非正常流れによる付加せん断応力  $\Delta\tau$  の影響が懸念されるが、 $\Delta\tau$  の大きさは、管路の非正常流れの運動方程式において、動水勾配が同一平均流速の定常流のそれに等しいとすれば、 $\Delta\tau = \rho R (\partial U_m / \partial t)$  で評価される。ここで  $R$  は径深、 $U_m$  は断面平均流速である。 $\Delta\tau = \rho R (\Delta U_m / \Delta t)$  と近似して  $\Delta\tau$  を求めた結果、 $\Delta\tau / \tau$  は  $10^{-2}$  のオーダーとなり、非正常流れによる  $\Delta\tau$  の影響は無視できると判断した。

実験において各底泥の含水比は、原則として6通り変化させた。底泥の量が少ないものはこの限りでない。各含水比条件ごとに3回の流送実験を行った。所定の含水比の底泥を移動床部に敷いた後、直ちに流送実験を行なった。図4-6の沈降曲線が示すように、粘度が  $\eta_1 > 0.07 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  の条件の底泥は、界面が現れるのに100分近く必要とする。また界面沈降が生じたとしても、初期は等速沈降区間で表層近くの濃度は変化しない。2時間以内であれば、今回の含水比条件の底泥は、初期含水比(濃度)のまま存在しており、圧密等による底泥の特性の変化は無視できると考えられる。

流送実験は、水温・泥温とも  $20 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  の条件で行った。実験を行った含水比条件は、底泥によって異なるが、各底泥とも粘度は  $0.05 < \eta_1 < 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  (但し、第二底泥グループは  $\eta_1 = 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  もある)、降伏値のあるものは  $0.05 < \tau_{y1} < 2 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 、含水比は  $w > w_L$  の条件に収まっている。

第 7.4 節 底泥の流送形態<sup>1),2)</sup>

7.4.1 流送形態による底泥のグループ区分

限界掃流力を求める実験は、表 3-1 の全ての底泥について行った。底泥の流送形態は大別して

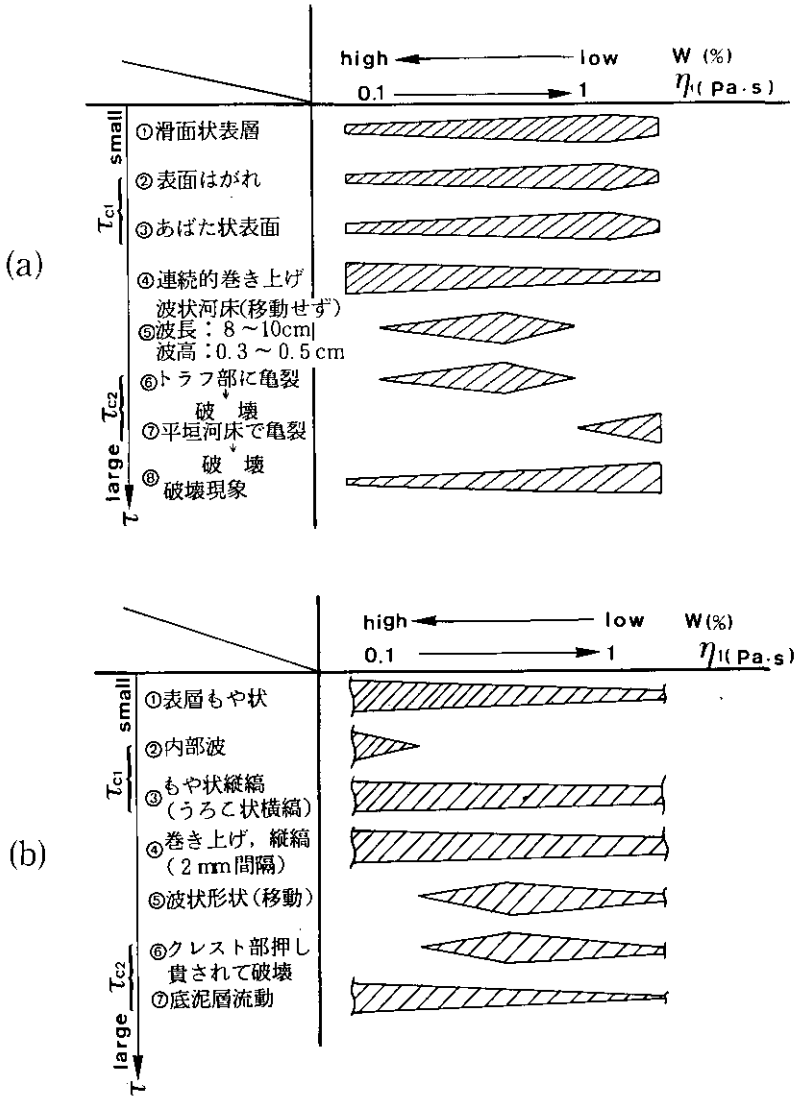


図 7-2 各底泥グループの流送形態の特徴  
Fig. 7-2 Characteristics of mud transportation modes for each mud group

二つのグループに分類され、その分類が第4章、第5章で述べた沈降特性及び流動特性による分類と一致した。河口部泥は、底泥の量の制限から沈降特性、流動特性の実験ができなかったため、それらとの関連は議論できない。しかし流送形態の面から言及すれば、それらは霞ヶ浦底泥の化学的処理泥と類似の特徴を示し、一応、第一底泥グループに分類できる。底泥の流送形態を模式的に図7-2に示す。図7-2(a)は第一底泥グループの場合を、図7-2(b)は第二底泥グループの場合である。横軸は、粘度 $\eta_0$ が指標であり、底泥の充てん状態によって決まるものである。縦軸は、せん断応力 $\tau$ と観察された特徴的な現象を示す。これらは、原則的にせん断応力の増加に伴って現れる順に記してある。現象が顕著な場合ほど斜線部が広い。 $\tau_{c1}$ および $\tau_{c2}$ は、著者が定義した流送限界と破壊限界である\*。

#### 7.4.2 第一底泥グループの流送形態の特徴

第一底泥グループの最も特徴的な現象は、水流と底泥の間の明瞭な界面の存在と、破壊する少し前に河床に現れる流れ方向に直角な亀裂である。粘度が $\eta_0 > 0.5 \sim 0.7$  Pa·sでは、せん断応力が大きくなると、平坦河床の状態で移動床上流端近傍や河床の小さな凹凸部に、長さ1~2 cm、幅1~2 mm、深さ2~5 mm程度の大きな亀裂が1本ないしは2本発生し、そこを起点として移動床全域にわたり破壊する。粘度が $0.1 < \eta_0 < 0.7$  Pa·sでは、移動床流端より20 cm程度下流部分から全域にわたり、波長8~10 cm、波高2~5 mmの波状河床が形成され、そのtrough部に、長さ5 mm以下、幅1 mm程度、深さ2 mm程度のひびが横断方向に数本発生し、そこから破壊が生ずる。粘度の低下とともに、ひび割れは小規模となり、破壊も局部的で弱いものが各所でおこる。粘度が $\eta_0 < 0.1$  Pa·sでは波状河床は観察しにくく、激しい巻き上りと破壊との区別がつかなくなる。このタイプの波状河床は、湖沼泥の場合が最も顕著に観察された。カオリナイト、モンモリロナイトは大きな亀裂や破壊のほうが特徴的で、波状河床はあまり顕著ではなかった。また河口部泥や霞ヶ浦化学処理泥は、波状河床が現れても小さく、不明瞭で大きな破壊はなく局部的破壊や激しい巻き上がり特徴であった<sup>9)</sup>。波状河床の発生源は、移動床の上流端効果にあると考えられるが、底泥側の要因としては、底泥中の有機物による延性効果が考えられる。親水性の有機物による何らかの連結作用によって、ある程度の河床変形を許容し、応力集中に帰因する破壊を抑制するものと考えられる。今回用いたカオリナイト、モンモリロナイトは、疎水的なので、脆性強度は大きくても延性効果が小さいために、小さな河床歪みが吸収されず、そこから破壊が進行してゆくと考えられる。河口部泥や化学処理泥は、相対的に粘着力が小さいために、河床全体としての連絡性に乏しく、個々の構造単位として難脱・浮遊するので、波状形状が形成されにくいものと考えられる。湖沼泥においても、含水比が低くて粘度が高いと、波状形状が形成されず破壊する。これは、底泥中の水の存在形態や機能が含水量によって微妙に変化するためと考えられる。また脆性の破壊か延性の破壊かというのは、応力のかかる速度や変形速度にも依存するので、粘度が高い

\* 8.3.1において定義する。

底泥の場合は破壊時のせん断応力や局所流速が大きいいため、破壊し始めた部分の変形速度が大きくなり脆性的破壊形態になりやすいことも考えられる。

#### 7.4.3 第二底泥グループの流送形態の特徴

第二底泥グループの底泥の流送形態の主な特徴は、底泥表層での水との境界面が不鮮明で、もや状の層があること、いかなる場合も河床に亀裂やひびが生じなかったことである。Na<sup>+</sup>-ベントナイトは、親水性のため水との境界面が拡散的になっている。このため境界面に無視できない濃度境界層があり、通水によりそれがもや状の縦縞として巻き上がったと考えられる。縦縞間隔は約5mmで、流送限界付近ではその間にうろこ状の微少な横縞が現れた。せん断応力の増加とともにうろこ状横縞は消滅するが、縦縞は間隔が狭くなって全域に存在する。観察の限りでは、縦縞の間隔は一律でcoherent性は認められなかった。このグループでは、粘度が $\eta \geq 10$  Pa·sと大きな条件でも一律な巻き上がりがあり、 $\tau = 1$  N/m<sup>2</sup>の条件で一時間通水すると、2~3mm程度の河床低下が認められた。この場合破壊は起らず、通水後の河床は、表層の2~3mmの部分がそれより深より柔らかくなっていた。粘度が $0.3 < \eta < 2.5$  Pa·sでは、波長5~10cm、波高2~3mmの波状河床が形成され、それが下流へゆっくり移動する。しかし河床に亀裂やひびは生じない。最後にはcrest部が、0.01~0.02 m/sの速度で押し潰されながら破壊が進行する。粘度が $\eta < 0.1$  Pa·sでは、流送限界より小さいせん断応力で、波長3~4cm、波高0.5~1mmの内部波が発生した。せん断応力の増大に伴ない、巻き上げも激しくなり、河床流動も観察される。この場合破壊が定義できない。このグループの底泥は、粘度が $0.3 < \eta < 2.5$  Pa·sでは、波状河床を形成したが亀裂などは生じなかったのは、主に交換性陽イオンがNa<sup>+</sup>であるためと考えられる。一般に、一価の陽イオンの吸着により、粘土の延性は大きくなり脆性強度は小さくなる。つまりNa<sup>+</sup>-粘土は延びはよいが腰の強さは小さい。波状河床が形成され、それがゆっくり移動するという条件は、底泥が降伏したが切断せずに延びていることであり、Na<sup>+</sup>-粘土はその条件を満たす。

#### 7.4.4 デンブンおよび寒天含有の影響

デンブン含有によって、底泥は延性効果を増し、カオリナイトの場合も霞ヶ浦底泥3\*の場合も、波状河床を形成するようになった。特にデンブン含有ベントナイトの場合、延性効果の極端な例として、写真7-1のような河床形状が観察された。流れと直角方向に鋭い峰をもった三角形状が形成され、それがゆっくりと下流へ移動した。この現象は、底泥自体は流動しているが、切断されていないため起こったものである。

寒天含有によっては、デンブン含有の場合とは逆に、底泥は脆性強度は増すが、延性効果は減小する傾向がある。これは、寒天含有土の構造単位となる粒径が大きいことも原因としているであろう。粒子は比較的等方体な塊として離脱・流送される。

---

\* H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>加熱処理したものにデンブンを10%含有させたもの

常温におけるデンプン・寒天の変形に関する特性、即ち、デンプンは腰はないがねばりが強く、寒天は腰は強いがねばりがないという特徴がある程度流送形態にも反映された結果となった。

#### 7.4.5 底泥の代表的な流送形態

底泥の流送形態に対して、代表的なものを写真7-2<sup>1),2)</sup>に示す。一連の写真は、せん断応力の増加に伴う河床状態の変化を示す。番号の若い方から順にせん断応力が増加している。(a)は霞ヶ浦底泥1の増成であり、第一底泥グループの代表的流送形態である。せん断応力が流送限界より小さいときは、表面は滑面状で、流送限界を越えるとアバタ状の床面となる。せん断応力の増加とともに、飛び出し量が増加し波状河床が形成されて trough 部に亀裂が生じ、その部分から破壊が進行してゆく。(b)は霞ヶ浦底泥4\*の場合で、延性の乏しい流送形態の一例である。表面には、100  $\mu\text{m}$  前後の粒子が目立つ。せん断応力が流送限界を越えると、底泥粒子が一様に飛び出し、せん断応力とともに飛び出し量も急増し、河床低下が速やかに進行するが破壊は観察されなかった。(c)はデンプン含有ベントナイト(No14)で、河床面にもや状の縦縞が現われ、せん断応力の増加とともに波状河床が形成され、crest 部が押し潰されるように破壊する。これが、第二底泥グループの代表的な流送形態である。(d)は高含水比のベントナイトの場合で、内部波が認められる。せん断応力の増加とともに、巻き上げも多くなり河床も流動している。

#### 7.4.6 巻き上がり粒子の大きさ

底泥が巻き上がる際の粒子径についてふれる。実験を通した全般的傾向としては、せん断応力が破壊限界以下の巻き上げの現象では、粒子径は特に目立った凝集体もなく、表3-1に示した各底泥の粒子構成と、大差ないようであった。一例として、霞ヶ浦沈降物の巻き上げ後の粒度分布の測定では、平均粒径  $d_0$  は、 $d_0/d_m=1.2\sim 2$ の結果となった。一方、破壊時や、亀裂部から巻き上がる場合の粒子径は、かなり幅広く分布し、代表径が2~3 mmとなることも少なくなかった。また湖沼泥の場合、滑面上の表面がはがれる際の大きさは、厚さ0.5 mm程度、1~数 $\text{mm}^2$ の片隣状が多く観察された。あばた状になってからは、微細粒子から100  $\mu\text{m}$  前後の粒子まで幅広く観察された。

#### 7.4.7 流送形態と沈降および流動特性との関連<sup>4),5)</sup>

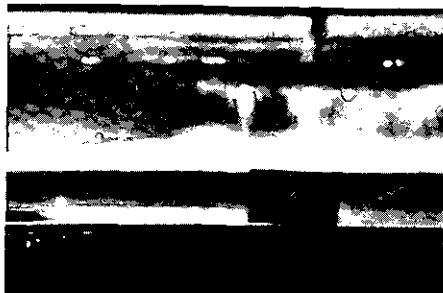
第一底泥グループの沈降・流動特性の特徴は、界面沈降、降伏値の存在、流動曲線の急激な折れ曲がりであり、流送形態の特徴は、河床面での亀裂である。第二底泥グループでは、沈積面の出現と微細粒子の安定した分散系の存在、降伏値がなく流動曲線にベキ法則が成立すること、が特徴である。流送形態では、もや状の縦縞の形成、波状河床の移動、および河床に亀裂が生じないことが特徴である。これらを総合すると、第一グループの底泥は、高含水比では不安定で凝集

\*  $\text{H}_2\text{O}_2$ 加熱処理したものに寒天を10%含有させたもの

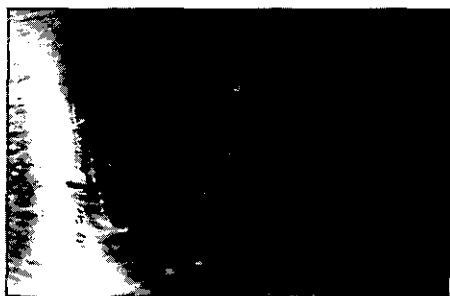




平面図P-(1)



正面図F-(1)



平面図P-(2)



正面図F-(2)



平面図P-(3)



正面図F-(3)

写真 7-1 デンプン含有ベントナイト（5%）の流送形態（鋭い頂点をもった三角形状の出現と流下）

Photo 7-1 Transportational characteristics for the Bentonite containing starch (5%) (Appearance of triangular form with the acute angle and its slow flowing downstream)

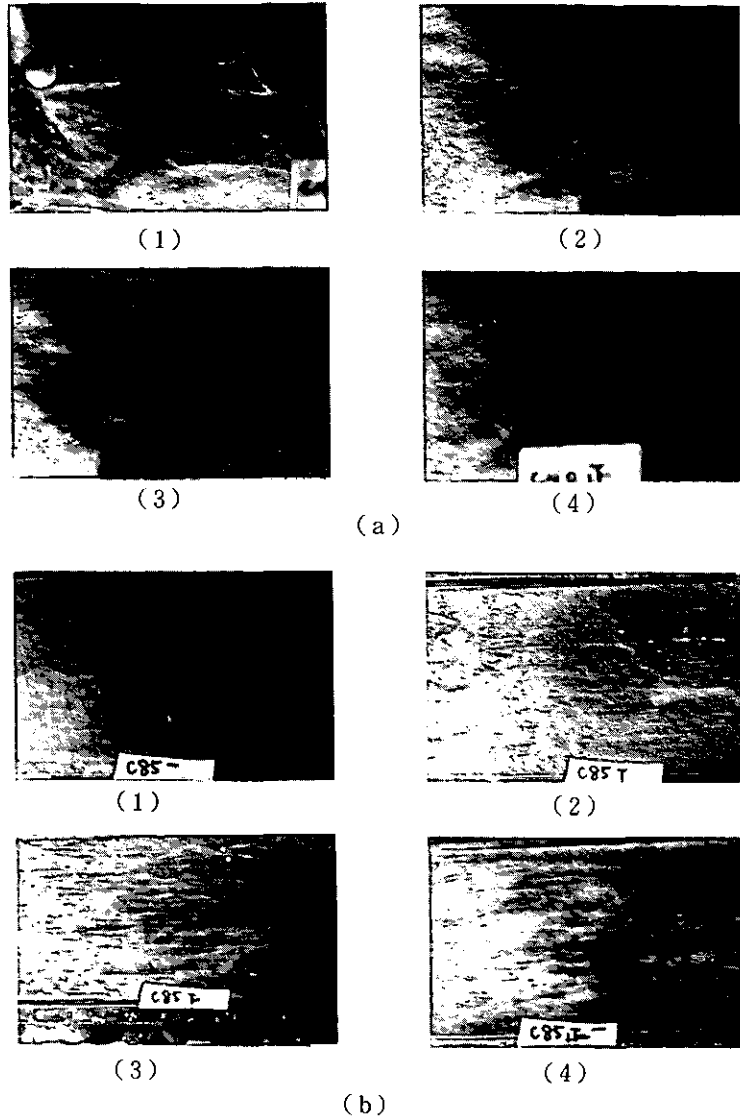


写真 7-2 底泥の流送形態の代表例  
 (a) 霞ヶ浦底泥 1  $w=530\%$   
 (b) 霞ヶ浦底泥 4 ( $H_2O_2$ 加熱処理後寒天を 10%含有させたもの)  
 $w=515\%$   
 Photo 7-2 Representative transportational forms of muds and clays  
 (a) Kasumigaura Mud 1  $w=530\%$   
 (b) Kasumigaura Mud 4 (treated by heating with  $H_2O_2$   
 (30%) and contained with agar (10%)  $w=515\%$



(1)



(2)



(3)



(4)

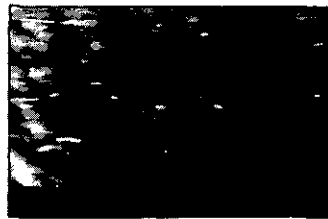
(c)



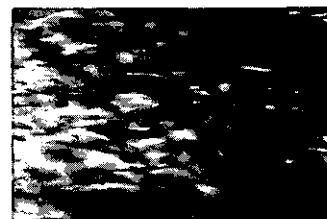
(1)



(2)



(3)



(4)

(d)

写真 7-2 (つづき)

(c) デンプン含有ベントナイト  $w=230\%$

(d) 高含水比条件のベントナイト  $w=440\%$

Photo. 7-2 (Continued)

(c) Bentonite containing starch (10%)  $w=230\%$

(d) Bentonite on the high water content condition in percent of dry weight  $w=440\%$

しやすく、低含水比になると降伏値をもつなど脆性強度は発揮するが延性に乏しく、小さい変形量で破断する。第二グループの底泥は、高含水比では安定で分散しやすく、低含水比では脆性強度はないが延性をもち変形量が大きい。これらの性質を規定するものは、交換性陽イオンとカ有機物質とかが考えられる。電気二重層を厚くする交換性陽イオンほど、また親水性有機物が多いほど、延性は増大すると考えられる。湖沼泥は、 $\text{Ca}^{2+}$ などの交換性陽イオンにより脆性をもち、腐植などの有機物のためにある程度の延性を持つものと考えられる。

### 第7.5節 結論

本章では、始めに流送実験の目的や必要性を述べ、限界掃流力や飛び出し量を求める実験に用いた装置、方法、手順を述べた。次に底泥の流送形態について論じた。流送形態も二つの底泥グループで異なる特徴を示した。両者の特徴を底泥グループごとに写真を混じえて説明し、その理由を考察した。第一底泥グループの特徴は、明確な界面の存在と、破壊する少し前に流れと直角方向に発生する亀裂もしくはひびである。第二底泥グループの特徴は、不鮮明な界面ともや状の縦縞の発生、さらにいかなる場合も河床に亀裂が生じないことである。デンプンおよび寒天含有粘土では、流送形態にそれぞれの有機物の常温での変形に対する特性が反映された。

沈降・流動特性および流送形態の特徴から、両底泥グループは、次のように特色づけられる。第一底泥グループは、高含水比では不安定で凝集しやすく、低含水比になると降伏値をもつなど脆性強度は発揮するが、延性に乏しく小さい変形量で破断する。第二底泥グループは、高含水比では安定で分散しやすく、低含水比では脆性強度はないが延性をもち変形量が大きい。

### 参 考 文 献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄 (1980) : 粘性土の限界掃流力について, 第16回衛生工学研究討論会論文集, 140-146.
- 2) 村岡浩爾・大坪国順(1980) : 底泥の限界掃流力に関する実験的研究, 国立公害研究所研究報告, 第14号, 33-55.
- 3) 大坪国順・村岡浩爾 (1980) : 底泥の限界掃流力について, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集第2部, 774-775.
- 4) 大坪国順・村岡浩爾 (1981) : 底泥の物性と限界掃流力の関連について, 第25回水理講演会論文集, 73-78.
- 5) 大坪国順・村岡浩爾 (1981) : 底泥の限界掃流力と物性の関連について (II), 土木学会第36回年次学術講演会論文集第2部, 3-4.

## 第8章 底泥の限界掃流力

### 第8.1節 概説

底泥の流送量を推定する目的の第一歩として、底泥の限界掃流力の定式化を試みた。砂粒における限界掃流力公式に対応するものを、底泥についても確立することが目的である。第6章で述べたように粘着性土に関する限界掃流力の研究は数多くなされているが、含水比の影響評価が欠如していたり、低含水比に対するものが大部分である。近年、底泥に関する限界掃流力の研究も少なくなき、含水比の影響や見かけ粘度との関係が論じられているようになったが、底泥全般にわたって限界掃流力を規定づけるまでには至っていない。

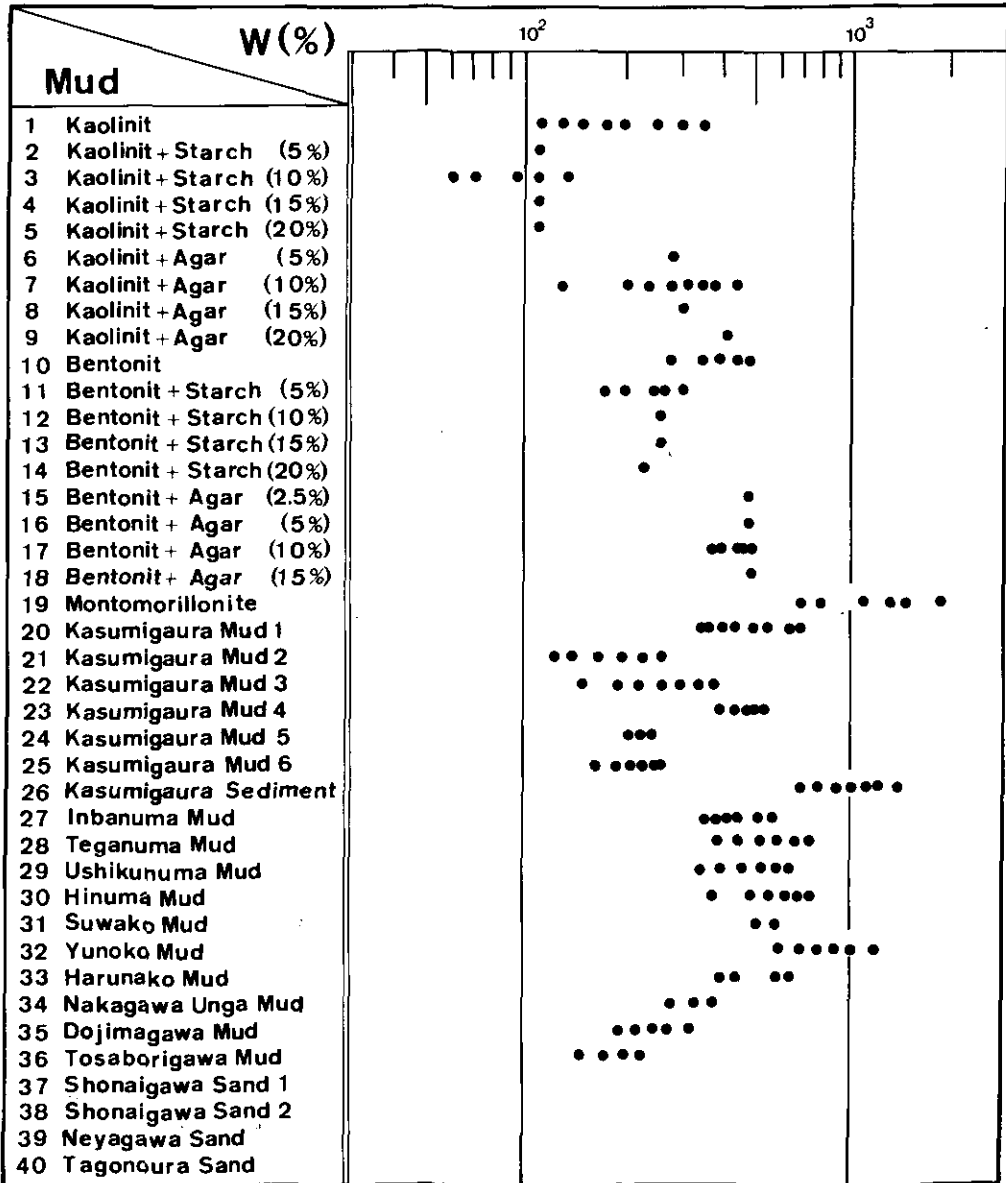
底泥の流送特性に関する研究では、限界掃流力、飛び出し率とも実験的研究が先行する。それは底泥の流送抵抗力の評価が非常に難しいことと、現象自体がまだよく明らかになっていないためである。本研究においても底泥の流送の現象を把握することから始まった。観察に基づいて、底泥の流送に関して二つの限界状態を定義することを提案し、二つの限界掃流力と底泥の物性との関係を検討した。そして限界掃流力を規定する物性量の解明と、それと限界掃流力との関係を求めた。その結果、二つの限界値とも粘度  $\eta_1$  との間に、各底泥グループごとに一義的な関係があることが判明した。また第一底泥グループの破壊限界  $\tau_{c2}$  は、降伏値  $\tau_{y1}$  にほぼ等しくなることも明らかとなった。

### 第8.2節 限界掃流力の実験

限界掃流力の実験は、表8-1の底泥について行った。表8-1には、実験を行った含水比条件を●印で示す。NO.1からNO.18については、有機物含有量の影響を評価するために調整した試料である。そのため、NO. 1, 3, 7, 10, 12, 17を除いては、一つの含水比に対してのみ限界掃流力を求めた。NO. 20から25のシリーズは、霞ヶ浦底泥について化学的処理による限界掃流力を検討するための実験である。

実験水路、試料の準備については、第7.3節に述べた。流量を所定の増加率で漸次増加させてゆき、限界時にピエゾ水頭勾配と流量を読み取り、採水を行った。限界の判定には、目視による方法とレーザー濃度計の出力の変化から判定する方法とを併用した。この判定規準には、主観的要素がはいるが、この段階では砂粒の場合のような確立された判定規準がないためやむを得なかった。ピエゾ水頭からのせん断応力の換算は、 $\tau = \rho g R I$  で求め、径深  $R$  としては底泥が平坦床の場合、床面は滑面であるとして  $R = A_r / S$  ( $A_r$ : 断面積,  $S$ : 潤辺) を採用した。破壊限界近く

表 8-1 限界掃流力を求めた種類と含水比条件  
 Table 8-1 List of muds and clays measured the critical shear stress and the water content condition in percent of dry weight for the hydraulic experiment



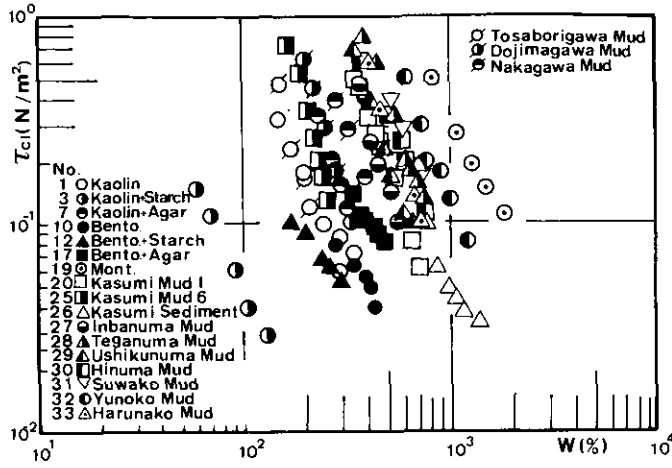


図 8-1 流送限界と含水比の関係

Fig. 8-1 Relationships between the shear stress for the limit of mud particle's movement and water content in percent of dry weight

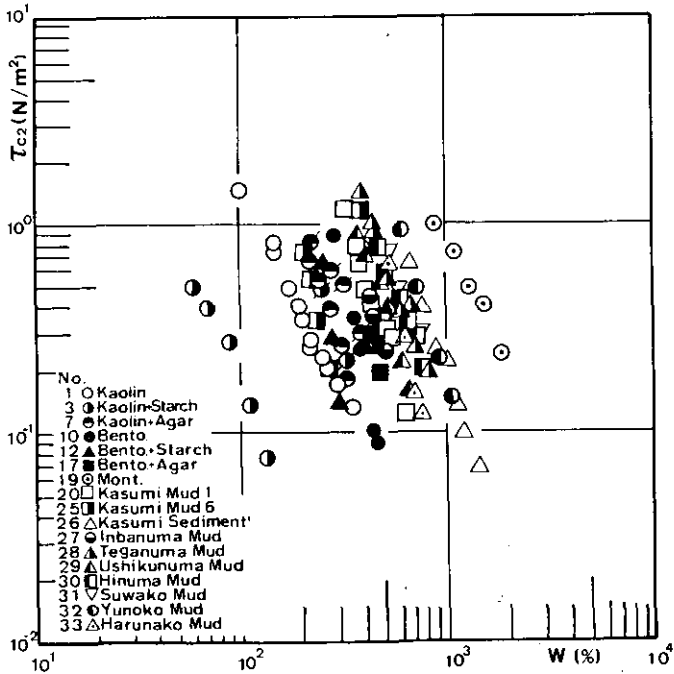


図 8-2 破壊限界と含水比の関係

Fig. 8-2 Relationships between the shear stress for the limit of bed destruction and water content in percent of dry weight

で波状河床が形成されたときの $R$ の評価に問題がのこるが、今回は特に補正を加えなかった。河床が平坦河床の場合に、適当な流量に対してはピエゾ水頭勾配 $I$ を読み流量 $Q$ と $I$ の関係を固定床実験と比較したが、ほとんど同じ関係が得られた。 $Re=U_m R/\nu>2000$  ( $U_m$ :断面平均流速,  $\nu$ :水の動粘性係数,  $R$ :径深)に対して $I$ は次式で近似される関係が得られる。

$$I \propto Q^{1.85} \quad (Q: 1/\text{sec}) \quad (8-1)$$

式(8-1)の $Q$ にかかる指数の値は滑面乱流における指数の値1.75~1.85に、ほぼ合致している。また、 $\tau=1\text{ N/m}^2$ ,  $d_m=5\text{ }\mu\text{m}$ とした場合、 $u_*d_m/\nu=1.6$ となり、表面粗度も滑面条件を満足している。

### 第8.3節 実験結果

#### 8.3.1 流送限界と破壊限界

底泥の流送実験の結果から、底泥の流送に関しては二つの限界掃流力の定義を提案する<sup>1)</sup>。一つは流送限界(the limit of mud particle's movement) $\tau_{c1}$ であり、他の一つは破壊限界(the limit of bed destruction) $\tau_{c2}$ である。前者は、底泥粒子が巻き上がり始める限界であり、現象的には砂粒の限界掃流力に対応するものである。後者は、河床面が破壊して、大量の底泥が時間に流送されてしまう限界である。従来の多くの研究者が求めた限界掃流力は、ここで定義した流送限界に対応すると思われる。例外として、細井ら<sup>2)</sup>の求めた限界掃流力は、破壊限界に対応するものであろう。また、馬場ら<sup>3)</sup>も二つの限界を提案しているが、定義が明確でないので今回の二つの限界との対応関係が不明であるが、少なくとも、第二限界掃流力は破壊限界に対応しないと考えられる。

流送限界以上の掃流力で底泥粒子が飛び出すが、破壊限界値近くなるまでは、大した河床低下はない。低含水比の底泥の場合、破壊は起こらず微小粒子が巻き上がるだけで、第一底泥グループの場合、 $\tau>1\text{ N/m}^2$ の条件での長時間通水でもほとんど河床低下がなかった。各底泥グループの流送限界時、破壊限界時の流送形態の特徴は、図7-2に示した。

#### 8.3.2 底泥の種類の影響

各底泥に対する流送限界および破壊限界と、含水比の関係を図8-1、図8-2に示す。同一含水比条件でも、底泥によって流送限界、破壊限界の値が異なることがわかる。湖沼泥は、河口部泥に比して流送限界、破壊限界ともかなり大きな値となっている。カオリナイト、ペントナイトとも、デンプン含有により流送限界、破壊限界の値は低下し、寒天含有により増加している。図8-3、図8-4は、流送限界および破壊限界と含水比の关系到及ぼす化学的処理の影響を、霞ヶ浦底泥に対して検討した結果である。 $\text{H}_2\text{O}_2$ 処理によって、底泥は粘着性が低下し、個々の構造単位として離脱・浮遊するのが特徴である。そのため流送限界はかなり減少し、亀裂の発生や破壊は起こらず、せん断応力が増加すると巻き上げが激しくなり速やかに河床低下する。この底泥に



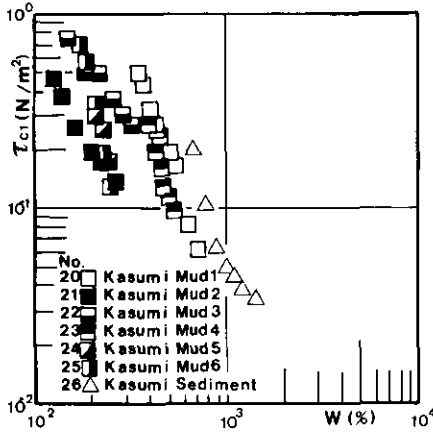


図 8-3 流送限界に及ぼす底泥の有機物処理の影響

Fig. 8-3 Effects of treatments for the organic matter in mud on the shear stress of the limit of mud particle's movement

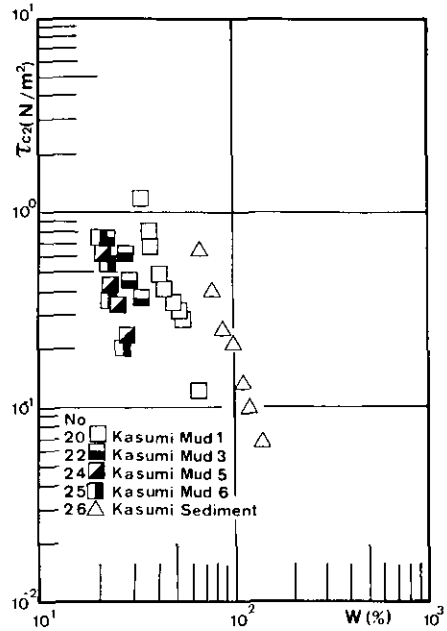


図 8-4 破壊限界に及ぼす底泥の有機物処理の影響

Fig. 8-4 Effects of treatments for the organic matter in mud on the shear stress of the limit of bed destruction

寒天を含有させても、流送限界は大きくなるが、流送形態の特徴は同じであった。デンプン含有によっては、せん断応力が増加するとともに波状河床が形成され、亀裂はなく crest から破壊した。脂肪除去や腐植除去によっても流送限界や破壊限界は減少し、その値は河口部泥と同程度のもとなった。図8-3、図8-4より、有機物除去により底泥の流送抵抗力が減少するのがわかる。

図8-5、図8-6は、デンプンおよび寒天含有量が流送限界・破壊限界に及ぼす影響を、カオリナイト・ベントナイトについて示したものである。カオリナイトの場合、流送限界・破壊限界とも、デンプン含有率の増加に対して減少し、寒天含有率の増加に対して増加の傾向が認められる。ベントナイトの場合も少し結果がばらつくが、カオリナイトと同様の傾向がある。図8-5において含有率5%、15%の寒天含有カオリナイトに対しては、破壊限界が現れなかった。この場合せん断応力の増加とともに、個々の土粒子が激しく巻き上り河床が低下した。図8-6において、含有率10%寒天含有ベントナイトの流送限界・破壊限界の値は、含水比が小さい条件であるにもかかわらず、他の含有率の場合よりかなり小さな値となった。このように寒天含有粘土の結果に

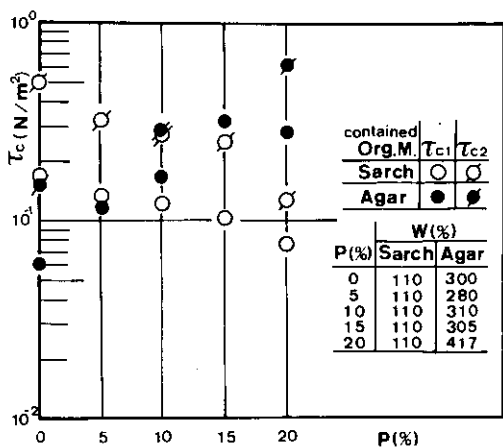


図 8-5 カオリナイトの流送および破壊限界に及ぼすデンプンや寒天の含有量の影響

Fig. 8-5 Effects of the starch and agar content in percent of total weight on the two critical shear stresses

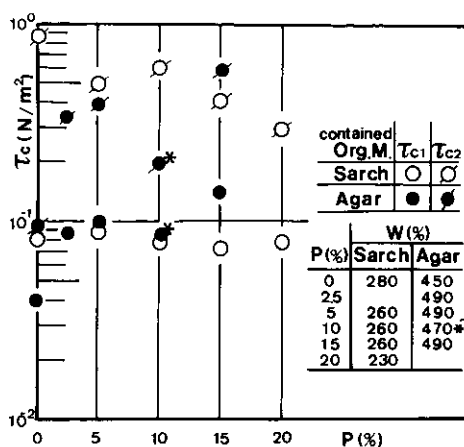


図 8-6 ベントナイトの流送および破壊限界に及ぼすデンプンや寒天の含有量の影響

Fig. 8-6 Effects of the starch and agar content in percent of total weight on the two critical shear stresses

バラツギが現れるのは、次の理由が考えられる。寒天含有粘土の場合、水分は寒天の立体構造に取り込まれるものと、自由水として存在するものがある。二つの形態の水分の比率によって、粘土の性質が著しく変化すると考えられる。また粘土粒子がどの程度均一に寒天の立体構造に混入するかによっても、含有粘土の性質が変化する。これらは最初の寒天溶液の濃度や粘土との練り上げの程度によって異なる。同一含有率の粘土でも同じ状態の粘土を再現するのは困難であった。寒天のような常温で塊状になる物質は、含有率の影響を検討するにはあまり適当でないと考えられる。しかし、一応今回の実験では、カオリナイト・ベントナイトとも、脆性強度が小さく延性の大きいデンプンの含有率が増加すれば両限界値とも低下し、脆性強度が大きい寒天の含有率が増加すれば両限界とも減少する傾向が認められた。

なお、試料番号 NO. 37~40 の試料は、すべて砂粒の限界掃流力公式が適用できた。

### 8.3.3 含水比の影響

図 8-1、図 8-2 の結果から NO. 37~40 の砂および砂質土を除いたすべての底泥について、流送限界・破壊限界は、含水比の増加とともに低下することがわかる。これが、含水比が高く飽和状態にある底泥の特徴である。不飽和土の場合は、必ずしもこの特徴を示さないことが Winterkorn<sup>9)</sup> や Grissinger<sup>9)</sup> によって報告されている。土粒子間の水分は、含水比が非常に小さい時は、粒子間の接着剤として働くのに対し、含水比の高い場合は、潤滑剤として作用する。両限界の定

義からしても、 $\tau_{c2}/\tau_{c1} > 1$ であるが、その値は含水比の増加とともに、小さくなる傾向がある。一般的な傾向として、同一含水比において粘度 $\eta_1$ が高い底泥ほど両限界値が大きい。含水率の増加に伴う両限界値の減少率は河口部泥が大きく、次に湖沼泥、粘土の順となっている。流送限界・破壊限界と含水比との関係には、底泥の二つのグループの差が現れていない。図8-1から図8-4までの結果は、二つの限界は含水比と何らかの関係をもつが、定数等は各底泥により異なり、含水比や濃度では底泥の二つの限界掃流力を規定できないことを示す。

## 第8.4節 限界掃流力と物性の関係

### 8.4.1 物理試験項目との関連

#### (i) 粒度構成の影響

粘土や湖沼泥の間では、流送限界や破壊限界に及ぼす粒度の効果は顕著でない。粘土では、粒径が同程度でも吸着陽イオン等の影響によって、両限界に大きな違いが現れている。湖沼泥では、粒度構成自体に大きな差がないので、両限界値の特性にもその影響が現れなかったとも考えられる。 $d_m \geq 50 \mu\text{m}$ となる河口部泥では、湖沼泥よりかなり流送限界・破壊限界が小さくなり、その値は霞ヶ浦有機物処理泥と同程度である。河口部泥の両限界値が、湖沼泥に比して小さくなったのは、粒径が大きくなったことにより比表面積比が減少し、表面力が膠結物質の割合が減少したためと考えられる。

#### (ii) 真比重と灼熱減量との関連

流送限界・破壊限界は、比重が小さなものほど、逆に灼熱減量比が大きなものほど、同一含水比条件での値が大きくなる傾向がある。この傾向は、最終沈降体積比・粘度および降伏値が示した傾向と同様である。

#### (iii) コンシステンシー指数とその関連

一般的な傾向としては、液性限界が高い底泥ほど流送限界・破壊限界が大きい。デンプン含有により液性限界の低下した粘土は二つの限界値とも低下し、寒天含有により液性限界が増大した粘土は二つの限界値とも増大する。これらの結果から液性限界は脆性強度を反映する量と考えられる。一方塑性限界は、その値の大小が必ずしも全種類の底泥に対して、何らかの性質を反映する指標にはならなかった。例えばカオリナイトや霞ヶ浦底泥では、デンプン含有により塑性限界が低下しそれにつれて延性が増大したが、湖沼泥と河口部泥では、後者の塑性限界が小さいにもかかわらず延性は小さい。土質工学の分野でも、塑性限界値が単独で何らかの指標になりうるかという点は明確になっておらず、通常、塑性指数と液性限界で土の性質を議論している。今回の結果の傾向として、塑性限界が高くても塑性指数が大きな底泥のほうが、塑性限界は低いが塑性指数も小さい底泥より、延性的挙動を示したが、モンモリロナイトや霞ヶ浦底泥4のような例外もあった。

#### 8.4.2 沈降特性との関連

流送実験の含水比条件と静水沈降実験の含水比はほとんど重複していないので、両者の特性を直接に比較することはできない。流送実験の含水比条件では、底泥は24時間静置で界面も沈積面も現れないか、もしくは最初から圧縮沈降を呈する。一般的傾向としては、第一底泥グループについては、同一初期含水比条件で最終沈降体積比の大きな底泥ほど、流送・破壊の両限界値も大きい。

#### 8.4.3 流動特性との関係

底泥の流送特性と流動特性との関係を検討するにあたり、流動特性としてどの特性値を選ぶべきかという問題がある。著者は、当初は簡易型粘度計を用い、それにより得られる粘度と二つの限界掃流力との関係を検討した。しかしこの粘度計はずり速度が変えられないため、非ニュートン流体の場合は、あるずり速度における見かけの粘度しか測定できない。底泥の流動曲線は第5章で示したようにかなり複雑なものであるので、上記の見かけ粘度では底泥の流動特性を代表しているとは言い難い。実際、簡易型粘度計で求めた粘度と二つの限界掃流力との関係では、同一底泥であれば粘度が大きい場合ほど両限界値は大きくなったが、底泥が異なる場合は同一含水比での粘度が大きな底泥が必ずしも両限界値が大きくなる結果となった<sup>7),9)</sup>。

底泥の飛び出し現象は河床に静止している底泥粒子が流れから力を受けて動き出す現象なので、飛び出し時の底泥のずりもずり速度も小さいと考えられる。そのため流動特性としても、その範囲の特性を示すものが必要となる。この条件に合うのは粘度 $\eta$ と降伏値 $\tau_{y1}$ であり、これらの特性値と二つの限界掃流力との関係を検討した<sup>7),9)</sup>。図8-7、図8-8は、それぞれ流送限界・破壊限界と粘度との関係を示したものである。両限界とも、各底泥グループごとに粘度と一義的な関係が認められる。

$$\text{流送限界} \quad \tau_{c1} = a \eta^{\alpha} \quad (8-2)$$

$$\text{破壊限界} \quad \tau_{c2} = b \eta^{\beta} \quad (8-3)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ は実験定数で、その値を表8-2に示す。表8-2には上記2式の適用範囲も示す。両限界値とも、 $\eta < 0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ になると底泥グループの差がなくなる。図8-7、図8-8には、二つの底泥グループの差が明確に現れている。実用的には、式(8-2)、式(8-3)で底泥の限界掃流力を規定できるが、両式は次元が合わないので、 $a$ 、 $b$ は次元を持った定数ということになる。第一底泥グループについては、粘度と降伏値の間に図5-22のような関係があるので、降伏値と二つの限界掃流力の間にも何らかの関係の成立が予想される。図8-9、図8-10は、それぞれ流送限界・破壊限界と降伏値との関係を示したものである。両限界とも、 $\tau_{y1}$ との間に一定の関係が認められた。

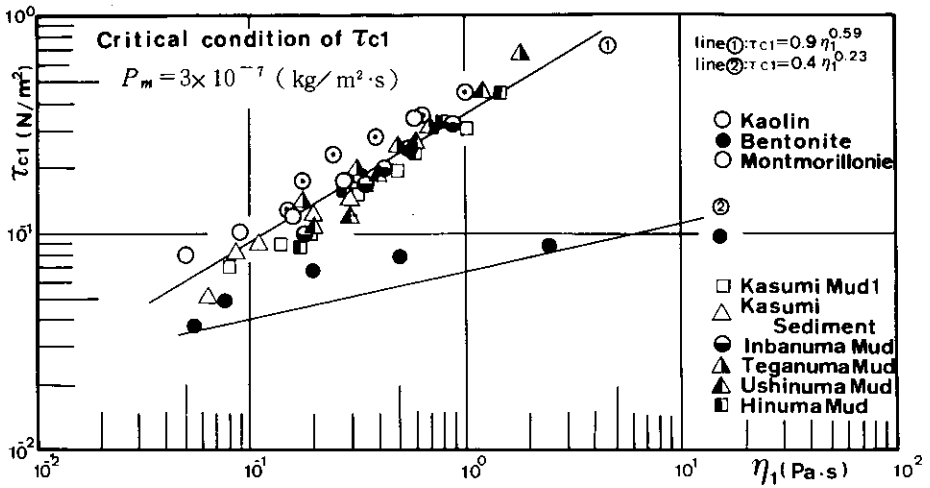


図 8-7 流送限界と粘度  $\eta_1$  の関係

Fig. 8-7 Relationships between the shear stress for the limit of mud particle's movement and the viscosity  $\eta_1$ .

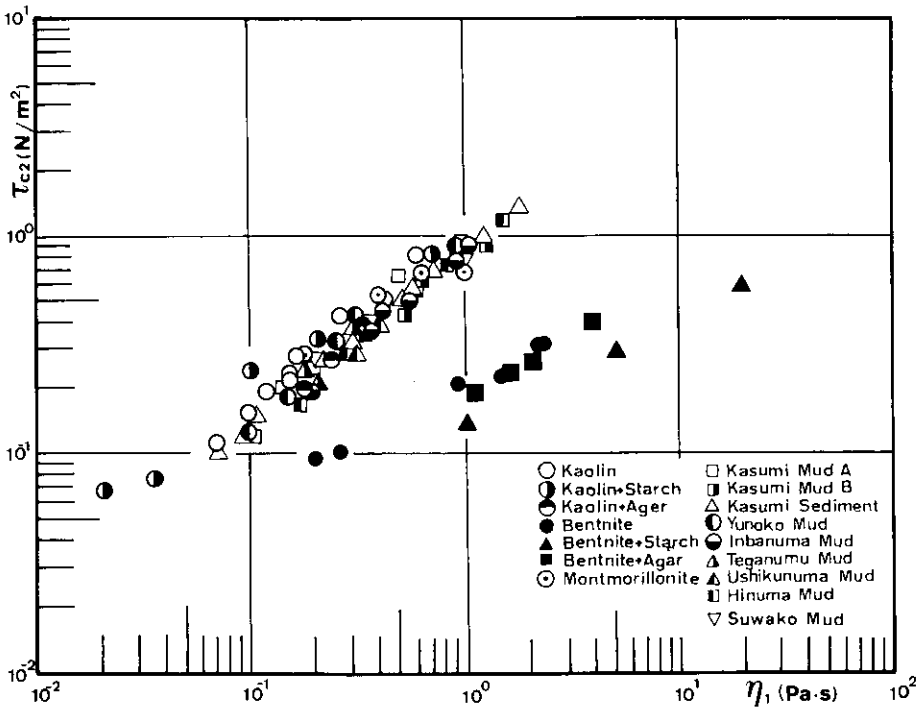


図 8-8 破壊限界と粘度  $\eta_1$  の関係

Fig. 8-8 Relationships between the shear stress for the limit of bed destruction and the viscosity  $\eta_1$ .

表 8-2 式 (8-2), 式 (8-3) 中の実験定数および適用範囲  
 Table 8-2 Experimental coefficients and adaptable viscosity range for the equations (8-2),(8-3)

		The first Mud group	The second Mud group
$\tau_{c1}$	adaptable ranges	$0.05 < \eta_1 < 4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$0.1 < \eta_1 < 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
	<b>a</b>	0.90	0.4
	$\alpha$	0.59	0.23
$\tau_{c2}$	adaptable ranges	$0.05 < \eta_1 < 2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$0.1 < \eta_1 < 20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
	<b>b</b>	1.3	0.67
	$\beta$	0.85	0.46

$\tau_{c1}$ : The limit of mud particles movement.

$\tau_{c2}$ : The limit of bed destruction.

$$\text{流送限界} \quad \tau_{c1} = 0.8 \tau_{y1}^{0.56} \quad (8-4)$$

$$\text{破壊限界} \quad \tau_{c2} = 0.9 \tau_{y1}^{0.94} \quad (8-5)$$

式 (8-5) より, 破壊限界が降伏値にほぼ正比例しその値もほぼ等しいことがわかる<sup>9)</sup>。実験結果も, 流送限界と降伏値との関係よりバラツキが少ない。破壊限界が降伏値より若干小さめとなる理由としては, 次のことが考えられる。降伏値を求める実験において, 底泥はせん断方向以外は運動が規制され, 作用する力も場所的に一様で時間的変動もない。また降伏値は底泥の内部構造の平均的な強度を示す量である。一方流送実験では, 底泥はいくらか上向きに自由度をもち, また作用する力も必ずしもせん断方向でなく場所的にも時間的にも変動する。流送実験では, 底泥は内部構造の弱い箇所から破壊しやすく, さらに底泥の表面の凹凸や移動床との接続部分などへの応力の集中がある。以上の理由により, 破壊限界値は降伏値より小さめになると考えられる。しかし, 図 8-10 の結果より, 第一底泥グループの破壊限界は降伏値と直接結びつけられた。

図 8-9 には, Mignot<sup>20)</sup>によって得られた限界掃流力と降伏値の実験式も併示してある。Mignot の実験式は, 次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \tau_c &= 0.316 \tau_y^{1/2} && (\tau_y \leq 1.5 \text{ N/m}^2) \\ &= 0.256 \tau_y && (\tau_y \geq 1.5 \text{ N/m}^2) \end{aligned} \right\} (8-6)$$

今回の実験範囲では, Mignot の実験式は, 流送限界に対してかなりよい近似式となっている。Mignot の限界状態の定義も著者と同様なものであった。Mignot の定義した限界掃流力と著者の定義した流送限界とのよい対応は, 二つの実験結果を相互に検証した形となった。Mignot の実験

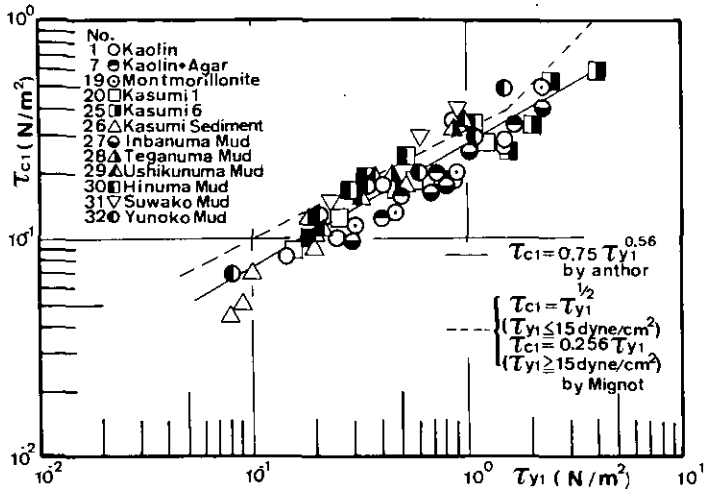


図 8-9 流送限界と降伏値  $\tau_{y1}$  の関係

Fig. 8-9 Relationships between the shear stress for the limit of mud particle's movement and the yield value  $\tau_{y1}$

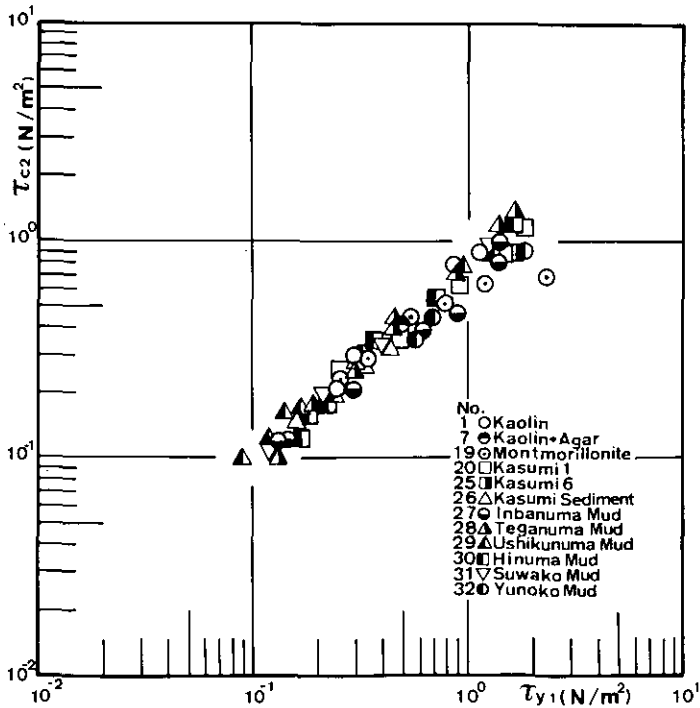


図 8-10 破壊限界と降伏値  $\tau_{y1}$  の関係

Fig. 8-10 Relationships between the shear stress for the limit of bed destruction and the yield value  $\tau_{y1}$

式(8-6)はあまり注目されておらず、著者も図8-9の結果を得た後に知った次第である。Mignot は式(8-6)の成立する理由については、あまり深く言及していない。

実験の底泥の限界掃流力を流送実験によらず推定したい場合、その底泥の粘度  $\eta$ 、もしくは降伏値  $\tau_{y1}$  を測定すれば推定できる。流動曲線の特徴からどの底泥グループに属するかを判断し、各底泥グループの関係から限界掃流力が推定できる。第一底泥グループは粘度からでも降伏値からでも推定できるが、降伏値が  $0.2 \text{ N/m}^2$  以下では誤差が大きくなるので粘度によったほうがよい。第二底泥グループは、降伏値が存在しないので粘度から推定するしかない。粘度や降伏値が測定できない場合、第一底泥グループに対しては、間接的には最終沈降体積比からある程度推定できるが、これについては第9.7節で述べる。

## 第8.5節 限界掃流力に関する理論的考察

### 8.5.1 流送抵抗力

底泥が流送される際の抵抗としては、重力抵抗、粘着抵抗、界面張力、表面張力などが考えられる。界面張力は、界面の面積が広ければ無視できる。表面張力は、不飽和状態の土では、かなり大きい。粘着抵抗は、降伏値由来のものと粘度由来のものがある。前者は現象の時間スケールに無関係な抵抗力であり、後者は応力のかかる速度・変形速度などによって変化する抵抗力である。例えば、降伏値がなくても非常に高粘度の物質は、応力が大きくても作用時間が短かければ変形せず移動抵抗を発揮するが、応力が小さくても長時間作用すれば変形はゆっくりではあるが進行する。一方、降伏値は持つが粘度が非常に小さい物質の場合は、作用時間が短くても応力値が高ければ破壊し、小さな応力ではそれが時間作用しても変化しない。一概には言及できないが、粘度による破壊抵抗は延性強度に関係し、降伏値は脆性強度に関係すると考えられる。

粘着力の原因としては Van der Waals 力・水素結合・静電結合や膠結物質の存在などが考えられるが、底泥に働く実際の引力はこれらの力の組み合わせであるのに加え、不規則な幾何形状と土粒子のランダムな配列のため、粘着力を定量的に解き明かすことはほとんど不可能である。

底泥の限界掃流力を評価するにあたって、粘度に起因する粘着抵抗力を含めるか否かの問題がある。応力の作用時間が短ければこの抵抗力も初期移動抵抗に寄与するが、流送現象の場合応力は常に底泥に作用しているので、粘度起因の粘着抵抗力は初期移動抵抗としては寄与できないと考えられる。この粘着抵抗力は運動に伴う力であって、むしろ第9章で底泥の飛び出し率を評価する際に重要な因子となる。そのため限界掃流力を評価するにあたっては、粘度起因の粘着抵抗を考慮せず、静的釣り合い状態として現象をとらえるべきと考える。

### 8.5.2 初期移動機構

底泥の流送を考えるにあたって二つの取り扱い方が考えられる。一つは底泥を連続体として考える方法で、他の一つは何らかの形状・大きさをもった粒状体の集合として考える方法である。



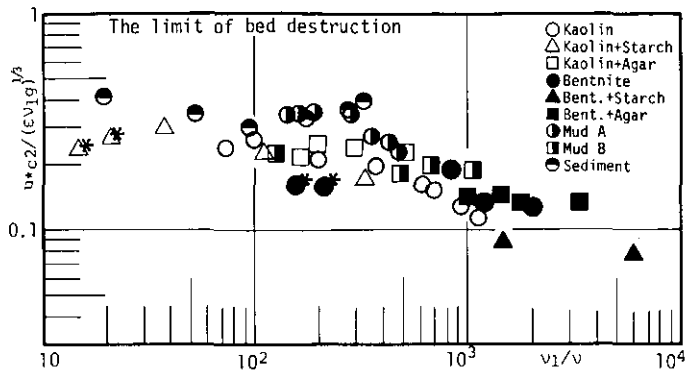


図 8-11 破壊限界に対するクーリガン数

Fig. 8-11 Keulegan Number for the limit of mud bed destruction

前者の立場に立って、限界状態を密度流での内部波の碎波と対応づけて、限界掃流力をクーリガン数で規定しようとする研究も行なわれた<sup>11)</sup>。この場合、対象となる限界掃流力は破壊限界に対応する。図8-11は、破壊限界に対して、 $K_1 = u_{*c2}/(\epsilon v_1 g)^{1/3}$ と  $v_1/\nu$  の関係を示したものである<sup>7)</sup>。ここで、 $u_{*c2} = \sqrt{\tau_{c2}/\rho}$ 、 $\epsilon = (\rho_1 - \rho)/\rho$ 、 $\rho_1$ ：みかけ密度、 $v_1 = \eta_1/\rho_1$ ：底泥の動粘度、 $\nu$ ：水の粘度である。 $K_1$ なる無次元量は、底泥の流送に対して粒径を無視しうるとして得られたものである。図8-11中、\*印の付いたデータが実際に流送時に内部波と見なせるものが観察されたものである。今回の実験では、粒径が小さく分散しやすく、破壊限界が  $0.1 \text{ N/m}^2$  付近の値の底泥に内部波が現れた。図8-11では、底泥によっては、 $K_1$ が内部波が観察された条件の $K_1$ より大きいにもかかわらず内部波が現れていないことがわかる。 $K_1$ の値は  $v_1/\nu$  と関数関係にあり、 $A_1 = \text{const.}$ で底泥の限界掃流力を規定できないし、内部波が現れる条件も決められない。どの底泥でも含水比が非常に高くなれば内部波が現れると考えられるが、第一グループの底泥は、自然状態ではそのような高含水状態では存在し得ない。デンプン含有カオリナイトの場合、実験では人為的に高含水比条件としたため内部波が現れたが、この懸濁体は静置すれば沈殿し水層と分離する。さらに第一底泥グループの流送形態は、亀裂の発生という内部波の概念とは矛盾する現象が現れるので、この底泥グループの流送に関しては内部波的な取り扱いはないと思われる。

著者は、底泥の流送状態の観察をもとに後者の立場をとった。底泥は、河床から巻き上がる際に粒子状で離脱する場合がほとんどであった。底泥の巻き上げ現象を底泥粒子の離脱として捉える場合には、粒子に作用する流体力とそれに抗する抵抗力との競合として現象をみるわけであるが、その抵抗力としては8.5.1で述べたように、重力起因のものほかに粒子間の結合力が考えられる。しかし粒子間結合力を定量的に評価するのは不可能に近い。そのため、本来連続体的的特性量である降伏値や粘度を取り上げ、これらは粒子間の複雑な結合力を包括したもので粒子間個々の粘着特性をも代表する量であると仮定して、降伏値や粘度によって粒子間結合力を評価した。

底泥の流送を粒状体として取り扱う場合、初期移動の形態としては転動離脱、揚力による浮上離脱、滑動離脱が考えられる。

河床にある底泥粒子には、図 8-12 に示すように重力（水力重量） $W_p$ 、抗力 $D$ 、揚力 $L$ のほかに粒子間の粘着力 $R_v$ が作用していると考えられる。着目している粒子の下流側隣接粒子との接線が平均河床面とのなす角を $\beta_0$ とする。簡単のため平均河床面は水平とする。

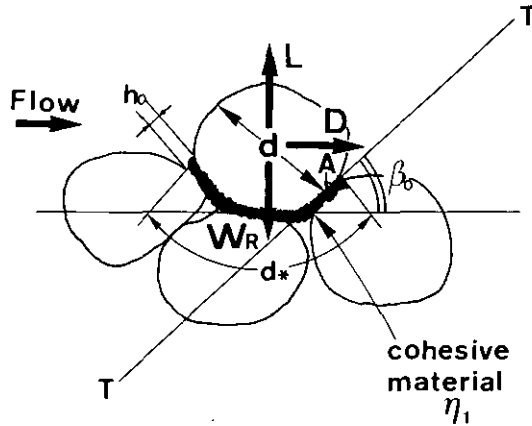


図 8-12 底泥粒子の状態図

Fig. 8-12 Depositional states of mud particles

### ① 転動離脱

転動離脱というのは、粒子がころがりながら離れ流下してゆくものである。ころがり始める静的な限界は、A点まわりのモーメントの釣り合いで考える。粒子は流れから回転モーメントを与えられ、重力と粘着力によるモーメントがそれに抵抗する。粒子が転動し始める限界は、モーメント式より次式で定義される。

$$l_L L \sin \beta_0 + l_0 \cos \beta_0 \geq l_W W_R \sin \beta_0 + l_R R_v \quad (8-7)$$

ここで、 $l_L$ 、 $l_0$ 、 $l_W$ 、 $l_R$ は各作用力のA点まわりのうでの長さである。左辺が流れによる回転モーメント、右辺第一項が重力による抵抗モーメント、右辺第二項が粘着力による抵抗モーメントである。

### ② 揚力による浮上離脱

この離脱様式は、流れから受ける揚力により粒子が重力や粘着力に抗して浮き上がり、流下するものである。この場合の限界条件は、鉛直方向の釣り合いより次式で与えられる。

$$L \geq W_R + R_{v2} \quad (8-8)$$

ここで $R_{v2}$ は粘着力による鉛直方向抵抗力である。

③ 滑動離脱

滑動離脱というのは、粒子がずりのみにより河床から離れ流下するものである。粒子がT-Tに沿ってずり始めるとすれば、T-T方向の釣り合いより次式が得られる。

$$L \sin \beta_0 + D \cos \beta_0 - W_R \sin \beta_0 \geq (W_R \cos \beta_0 + D \sin \beta_0 - L \sin \beta_0) \tan \phi_0 + R_{v3} \quad (8-9)$$

$R_{v3}$ は粘着力によるT-T方向抵抗力、 $\phi_0$ は摩擦角である。

各離脱様式とも、砂粒の場合には粘着抵抗力(右辺第二項)が無視され、底泥の場合には8.5.3に述べるように重力(右辺第一項)が無視される。砂粒の場合、初期移動形態は転動離脱が主要となることが辻本<sup>12)</sup>によって示されている。

底泥の場合には、どの離脱様式が主要であるかを検討する。転動離脱と揚力による浮上離脱では底泥粒子を隣接する粒子からひきはがす必要があり、滑動離脱では、底泥粒子をずりはがす必要がある。そのためひきはがしに要する力とずりはがしに要する力を評価して、その大小によりどの離脱様式が主要となるかを判定する。

まずひきはがしに必要な力を簡単なモデルで試算する。図8-12のように、粒子径 $d$ の粒子が隣接しその間隙を粘度 $\eta$ の物質が埋めているとする。簡単のため降伏値はゼロで水中重量も無視できるとする。結合部分を1辺 $d^*$ の矩形で厚さを $h^*$ とする。図8-13は、結合部分を拡大した説明

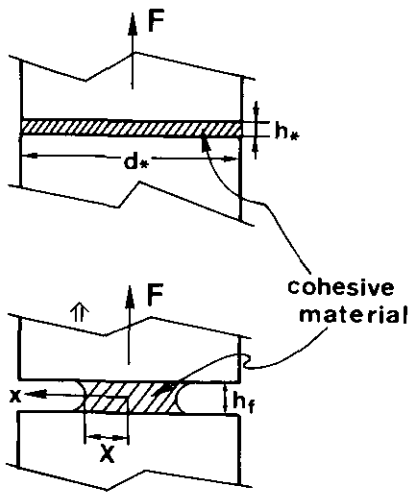


図 8-13 ひきはがし過程の模式図  
Fig. 8-13 Schematic figures of stripping off process of mud particle

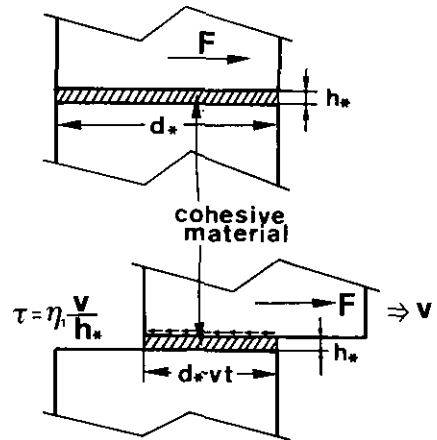


図 8-14 ずりはがし過程の模式図  
Fig. 8-14 Schematic figures of slipping off process of mud particle

図である。二つの粒子間の粘着物質が最初、広さ $d_*^2$ 、厚さ $h_*$ で存在していたものを、鉛直方向に力を加えて結合部分を0にしたとき、ひきはがしが完了したと考える。結合部分の中心点から、水平方向に $x$ 軸を定義する。紙面に直角方向に $y$ 軸を考え、粘着物質の挙動は $x$ 軸と同じとする。

中心点から $x$ の距離にある周囲を、単位時間に通過する粘着物質の量 $Q_x$ は

$$Q_x = 8x \frac{h_f^3}{12\eta_1} \frac{dP}{dx} \quad (8-10)$$

となる。ここで、 $h_f$ は粘着物質の厚さ、 $P$ は圧力である。一方、粘着物質の移動による結合部分の単位時間あたりの変形量 $4x^2 (dh_f/dt)$ は $Q_x$ に等しくなるので次式が成立する。

$$4x^2 \frac{dh_f}{dt} = 8x \frac{h_f^3}{12\eta_1} \frac{dP}{dx} \quad (8-11)$$

$$K_* = \frac{12\eta_1}{h_f^3} \frac{dh_f}{dt} \quad (8-12)$$

とすると、

$$\frac{dP}{dx} = \frac{x}{2} K_* \quad (8-13)$$

となり、 $x=X$ において $P=0$ とすると

$$P = \frac{K_*}{4} (x^2 - X^2) \quad (8-14)$$

を得る。またひきはがしに必要な力 $F$ と圧力 $P$ の間には

$$F = \int_0^X 8xP dx = 2K_* \int_0^X x(x^2 - X^2) dx = -K_* \frac{X^4}{2} \quad (8-15)$$

の関係がある。よって式(8-15)と式(8-12)より

$$\frac{12\eta_1}{h_f^3} \frac{dh_f}{dt} = -\frac{2}{X^4} F \quad (8-16)$$

が得られる。またひきはがしの過程では、粘着物の体積 $V_*$ は一定で

$$V_* = 4X^2 h_f = d_*^2 h_* \quad (8-17)$$

が成立する。式(8-17)を式(8-16)に代入し、ひきはがし終了時点で $h_f \rightarrow \infty$ とすると

$$Ft = -\frac{3}{32} \eta_1 \frac{V_*^2}{h_*^4} = -\frac{3}{32} \eta_1 \frac{d_*^4}{h_*^4} \quad (8-18)$$

が得られる。式(8-18)は、粘度 $\eta_1$ 、面積 $d_*^2$ 、厚さ $h_*$ の結合部をひきはがすのに必要な力積を与える。浮上離脱や転動離脱の場合には、上記のようなひきはがし力が必要となる。

次にずりはがしに必要な力を試算する。ずりはがし過程(滑動)についても、図8-12と同じ条件の結合部において、粒子がずれ始めてから離脱するまでの力積を考えることにする。いま、ずれがx軸方向のみに起こると仮定し、せん断応力は離脱過程中一定と仮定すれば、

$$\bar{F}t = d_* \int_0^t (d_* - vt) \eta_1 \frac{dv}{dy} dt \quad (8-19)$$

なる関係が得られる(図8-14参照)。 $\bar{F}$ は、 $t$ 時間の平均的力、 $v$ は粒子の移動速度で、せん断応力一定の仮定より一定速度である。また $d_*(d_* - vt)$ は、せん断応力の作用面積でありずりによる結合部の減少を評価したものである。

さて、ひきはがしを伴う離脱とずりによる離脱で、どちらが起こりやすいかを検討する。式(8-18)、式(8-19)は、いずれも限界時の静的釣り合い状態を示したのではなく、動き始めてから離脱するまでに、どのくらい力積が必要かを示したものである。よって、ここでは単位時間に離脱するのに必要な力の大小で、現象の起こりやすさを評価しようというわけである。式(8-19)において、単位時間に粒子がはがれたとして、 $u$ の大きさを $d_*$ (次元は $LT^{-1}$ )とし、 $dv/dy = d_*/h_*$ と近似すれば、単位時間に離脱させるために必要な平均的力 $\bar{F}$ は

$$\begin{aligned} \bar{F} \cdot 1 &= \frac{d_*^2 \eta_1}{h_*} \int_0^1 (1-t) dt \\ &= \frac{d_*^2 \eta_1}{2h_*} \end{aligned} \quad (8-20)$$

となる。 $F$ と $\bar{F}$ の大きさの比 $F_*$ を考え、 $h_* = a_* d_*$ とすると、

$$F_* = \frac{|F|}{|\bar{F}|} = \frac{3}{16} \frac{d_*}{h_*} = \frac{3}{16} \frac{1}{a_*} \quad (8-21)$$

となる。図8-15は $F_*$ と $a_*$ の関係である。

$a_* \leq 0.187$ で $F_* > 1$ となる。 $a_*$ が小さくなるほど $F_*$ は反比例して大きくなる。一般に、粘着力は粒子間距離の高次の項に反比例する性質の力であり、粘着力が支配的となっている状態、結合粒子の表面間隔が粒子間隔より非常に小さい場合である。つまり、 $d_* > h_*$ であり、 $a_* < 1$ が成立すると考えられる。このような状態では $F_* > 1$ であり、ひきはがしに要する力のほうがずりはがしに要する力より大きくなる。そのため、底泥粒子の移動の際には、力の少なくともすむ滑動離脱が主要となり、ひきはがしは補助的な役割をしていると考えられる。観察結果でも、離脱様式は滑動が主で転動や浮上は少なかった。河床から一旦離脱してしまえば、粒子は大きなものは滑動または転動で、小さくなると跳躍や浮上の形態で流下した。

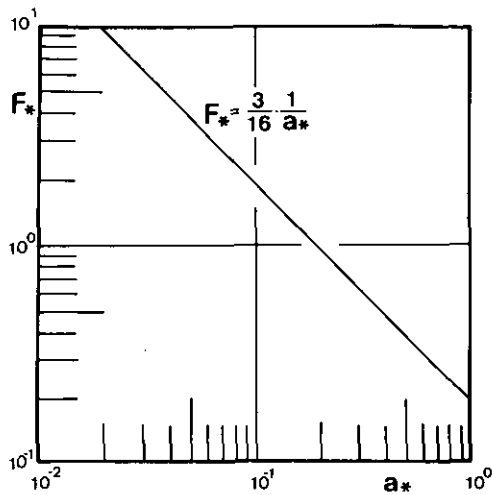


図 8-15 ひきはがし力とずりはがし力の比  $F_*$  の変化特性  
 Fig. 8-15 Changing properties of the ratio of the stripping force to the slipping force

### 8.5.3 限界掃流力に及ぼす重力の影響

8.5.1 に述べた主旨にそって、底泥の限界状態を静的釣り合い状態として捉える。この状態での釣り合い式は

$$\tau_c = \tau_{cg} + \tau_y \quad (8-22)$$

となる。ここで  $\tau_c$  は限界掃流力、 $\tau_{cg}$  は重力に起因する摩擦力、 $\tau_y$  は移動粒子周辺の降伏値である。 $\tau_{cg}$  は

$$\tau_{cg} = k_1 (\rho_0 - \rho) g d_0 \quad (8-23)$$

で与えられる。ここで  $k_1$  は比例定数、 $\rho_0$ 、 $d_0$  はそれぞれ底泥粒子の代表密度と粒子である。 $\tau_y$  は

$$\tau_y = k_2 \tau_{y1} \quad (k_2 \leq 1) \quad (8-24)$$

と考えられる。底泥の限界掃流力を評価するに際して、 $\tau_{cg}$  を考慮する必要があるか否かを検討する必要がある。表 8-3 は、 $\rho_0$ 、 $d_0$  の代表的な値に対して  $(\rho_0 - \rho) g d_0$  を求めたものである。①は、 $\rho_0$ 、 $d_0$  として、表 3-1 に示した底泥の真比重と平均粒径を用いた。②、③は、第 9.5 節においてモデル化した底泥の代表粒径と見かけ密度である\*。②は粒子を球状と仮定した場合、③は立方体と仮定した場合である。代表粒子の密度と粒径は、それぞれ次式で与えられる。

\* このモデルは 9.5.3 に示される

表 8-3 代表密度及び粒径と  $(\rho_0 - \rho) g d_0$  の値  
 Table 8-3 Representative density  $\rho_0$ , diameter  $d_0$  and the value of  $(\rho_0 - \rho) g d_0$

	$\rho_0$ ( $t/m^3$ )	$d_0$ ( $\mu m$ )	$A_3$	$(\rho_0 - \rho) g d_0$ ( $N/m^2$ )
①	$\sigma = 2.6$	$d_m = 20$	—	0.314
②	1.2	38	$\pi/6$	0.074
③	1.1	47	1	0.046

$$\rho_0 = \frac{1}{A_3} (\rho_l - \rho) + \rho \quad (8-25)$$

$$d_0 = \left\{ \frac{\rho + \sigma (w/100)}{\rho} \right\}^{1/3} A_3^{1/3} d_m \quad (8-26)$$

ここで  $\rho_l$  は底泥の見かけ密度、 $\rho$  は水の密度、 $A_3$  は体積に関する形状係数である。 $\rho_0$ 、 $d_0$  も含水比によって多少変化するが、平均的な値を用いた。含水比が高くなって降伏値が  $0.1 \text{ N/m}^2$  近くなった場合、 $\tau_{cg}$  は  $k_1$  の値によっては無視できないことも考えられる。非粘着性粒子の場合  $Re_* (= u_{*c} d / \nu) < 0.79$  では、 $k_1 = 0.14$  (岩垣公式<sup>14)</sup>) であり、Mantz<sup>15)</sup> の研究では、 $0.03 < Re_* < 1$  において、 $0.28 < k_1 < 0.1$  である。

底泥粒子の場合、 $k_1$  がどの程度の値となるかは、難しい問題である。微視的にみれば、静止摩擦係数を生み出す機構と粘着抵抗を生み出す機構は別のものではなく、何らかのかかわりを持っており区別するのは困難である。しかし上記の  $k_1$  の値は砂粒子が互いに直接接触している場合の値であり、少なくとも表 8-3 の①の条件には適用できない。高含水比の場合、①の条件では底泥は水中に分散して直接接触していない。このとき①の条件は、逆に  $\tau_{cg} = 0$  のモデルとなる(図 8-16(a) 参照)。

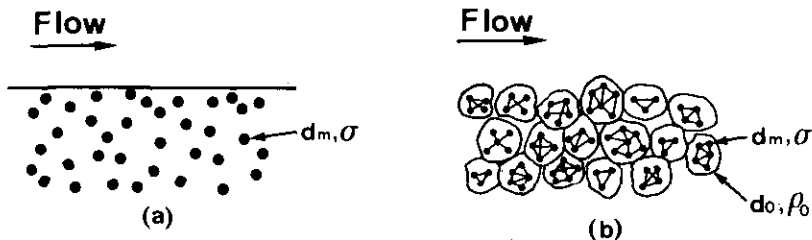


図 8-16 底泥の代表的粒子の密度と大きさのモデル  
 Fig. 8-16 Models of the representative density and diameter for the picking-up mud particle

②, ③の条件は, モデル化の際に図8-16(b)のように粒子の接触を考えているので,  $k_1$ の値としては0.2近傍の値を考えてもよい。その場合,  $\tau_{cg}$ は0.0148~0.1 N/m<sup>2</sup>となり,  $\tau_{y1}$ に比して約10分の1となる。よって通常の堆積状態では,  $\tau_{cg}$ は $\tau_y$ に比べて無視できる値と考えられる。

#### 8.5.4 底泥の限界掃流力

$\tau_{cg}$ が無視できると, 限界状態での釣り合い式は,

$$\tau_c = \tau_y = k_2 \tau_{y1} \quad (8-27)$$

となる。 $\tau_{y1}$ は, 底泥が流体として流動し始める限界値であるので, 式(8-24)の $\tau_c$ は破壊限界に対応するものと考えられる。8.4.2における流送・破壊の両限界に対する実験式も式(8-27)の成立を裏付けている。すなわち, 流送限界は降伏値 $\tau_{y1}$ の約2分の1乗に比例するのに対して, 破壊限界は降伏値にほぼ比例し値そのものもほぼ等しい。 $k_2$ が1以下になる理由は8.4.2で考察した。

既往の研究のほとんどは, 底泥の限界掃流力として流送限界に対する状態を考えているが, 著者は限界掃流力として, 破壊限界を考えることを提案する。今回の実験では, 破壊限界値が降伏値にほぼ等しい関係も得た。従来の研究では, 低含水比で,  $\tau_y \gg \tau_c$ なる結果が指摘されてきたが<sup>16), 17)</sup>, これは, 降伏値としてビンガム降伏値( $\tau_{y2}$ に対応)を用いていること, 限界掃流力として流送限界を考えているため, と考えられる。著者の実験でも, 粘度 $\eta_1$ が1 Pa·sに近い条件では,  $\tau_{y2} \gg \tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ の結果が得られている。流送限界は, 現象的には砂粒の移動限界に近いが, 粘度が大きくなるにつれて $\tau_{y1} \gg \tau_{c1}$ となり, 現状では流送限界を規定する抵抗力が見当たらない。界面付近で底泥の濃度境界層が発達し,  $(\eta_1)_{inner} > (\eta_1)_{surface}$ であるため,  $(\tau_{y1})_{inner} > (\tau_{y1})_{surface} = \tau_{c1}$ , という仮説も考えられるが, 第一グループの底泥は界面が鮮明で,  $(\eta_1)_{inner} \doteq (\eta_1)_{surface}$ である。また仮に $(\tau_{y1})_{surface} \doteq \tau_{c1}$ としても

$$(\tau_{y1})_{surface} \propto (\tau_{y1})_{inner}^{1/2} \quad (8-28)$$

となる理由が必要となる。式(8-28)は両辺の次元が異なり, その合理的説明は現状ではできない。流送限界は, 流れのせん断応力が平均的には $\bar{\tau} < \tau_c$ にもかかわらず, 流れの変動のため, 瞬間値として $\tau > \tau_{y1}$ の状態が起これ, その時に飛び出した底泥粒子の量が無視できなくなった限界と解釈される。すなわち流送限界は, 底泥の運動方程式に基づいた初期移動機構を検討することによって評価される性質のものと考えられる。このような観点から, 流送限界を見直すと今回の実験においては, 底泥粒子の飛び出し量 $P_m$ の微小な一定値

$$P_m = \text{const} \doteq 3.0 \times 10^{-7} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{sec}) \quad (8-29)$$

で, 流送限界と判定していたことが明らかとなった。

以上の考察により, 底泥の限界状態を静的釣り合いでとらえ破壊限界をもって限界掃流力と定



義する。破壊限界値は、基本的には降伏値と同一になるべきものであるが、流れの変動等の種々の原因により、実験的には式(8-5)の関係が得られた。

これまでの限界掃流力の議論は、降伏値の存在する第一底泥グループに適用できるものであって、ベントナイトのような第二底泥グループには適用できない。第二グループの場合、静的釣り合い条件としての抵抗力は重力抵抗のみである。図8-7において、第二底泥グループは粘度が増加しても流送限界はあまり大きくならない。この事実も上記のことを裏付けている。しかし、 $\tau_{cg}$ の値が8.5.3で求めた程度の値とすれば、流送限界 $\tau_{c1}$ ですら $\tau_{cg}$ よりかなり大きな値となっている。第二底泥グループの場合、界面が不鮮明なことから、底泥表面の状態の解明が必要である。また実験で求めた流送限界、破壊限界には、粘度に起因する粘着抵抗の影響が含まれている可能性があるので、その点を含めて第一底泥グループの場合とは異なった考察が必要であらう。この点については今後の研究としたい。

## 第8.6節 結論

本章では、底泥の限界掃流力に関する実験的、理論的研究について論じた。実験の結果、底泥の流送に関しては、流送限界と破壊限界という二つの限界状態の定義を提案した。限界掃流力も最終沈降積比と同様、同一含水比ではなく同一粘度条件でその値が規定される。両限界値とも、二つの底泥グループごとに粘度( $\eta$ )との間に、両対数紙上で直線関係が得られた(図8-7、図8-8参照)。第一グループの底泥は、降伏値( $\tau_{y1}$ )とも両対数紙上でよい直線関係が得られた。流送限界は降伏値の約2分の1に比例し、破壊限界はほぼ正比例する。理論的考察は、主に第一底泥グループに対してなされた。底泥の初期移動機構として、離脱に要する力積を各様式について評価した結果、滑動離脱が主要となることを導いた。さらに流送抵抗力として、重力起因の抵抗力は粘着力に比べて無視できることを示した。底泥の限界状態は静的釣り合い状態として捉えるべきと考え、結局降伏値のみが流送抵抗力となることを示した。そして、破壊限界が降伏値にはほぼ一致するという実験結果から、底泥の離脱の限界条件として、 $\tau$ (流れの瞬間的なせん断応力) $\geq \tau_{c2}$ (破壊限界)を提示した。従来の研究では、流送限界が砂粒の移動限界に現象的に類似しているためにこれが底泥の限界掃流力と考えられてきたが、著者は、流送限界は粒子の飛び出し量が無視できなくなるせん断応力の上限值という現象論的なもので、静的釣り合い状態では定義できないものであることを示した。著者が実験で求めた流送限界値は、飛び出し量がおおむね $3.0 \times 10^{-7}$  kg/m<sup>2</sup>sとなるせん断応力に対応していることがわかった。

## 参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾・高野恒雄(1980):粘性土の限界掃流力について、第16回衛生工学研究討論会概要集, 140-146.

- 2) 細井由彦・住友恒・岩井重久 (1979) : 底泥の巻き上げに関する実験的研究 (II), 第 15 回衛生工学研究討論会論文集, 28-33.
- 3) 馬場洋二・佐々木重義・伊藤雄二 (1974) : ヘドロ河床の流れによる洗掘特性, 土木技術資料, 16, (10), 28-33.
- 4) Winterkon, H. F. (1942) : Mechanism of water attack on dry cohesive soil systems, Soil Science, 54, 259-273.
- 5) Grissinger, E. H. (1966) : Resistance of selected clay systems to erosion by water, Water Resources Res., 2, 131-138]
- 6) 大坪国順・村岡浩爾 (1980) : 底泥の限界掃流力について, 土木学会第 35 回年次学術講演会概要集, 第 2 部, 774-775.
- 7) 大坪国順・村岡浩爾 (1981) : 底泥の物性と限界掃流力の関連について, 第 25 回水理講演会論文集, 73-78.
- 8) 大坪国順・村岡浩爾 (1981) : 底泥の限界掃流力と物性の関連について (II), 土木学会第 36 回年次学術講演会概要集第 2 部, 3-4.
- 9) 村岡浩爾・大坪国順 (1983) : 水界における底泥の挙動に関する研究, 国立公害研究所研究報告\*.
- 10) Mignot, P. C. (1968) : Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, Houille Blanche, 23, (7), 592-620.
- 11) 細井由彦・住友恒・岩井重久 (1979) : 底泥の巻き上げに関する実験的研究 (II), 第 15 回衛生工学研究討論会論文集, 28-33.
- 12) 辻本哲郎 (1975) : 砂礫の移動に伴う河床波の発達に関する基礎的研究, 京郡大学修士論文.
- 13) 井本立也 (1963) : 概説レオロジー (上), 東京化学同人.
- 14) 土木学会編 (1971) : 水理公式集.
- 15) Mantz, P. A. (1977) : Incipient transport of fine grain and flakes by fluids-Extended Shields Diagram, Proc. A.S.C.E, 113, HY6, 601-615.
- 16) 粟谷陽一・楠田哲也・海田輝之 (1979) : 底泥の巻き上げに関する基礎的研究, 第 15 回衛生工学研究討論会論文集, 21-27.
- 17) 青木美樹・首藤伸夫 (1982) : 粘性土堆積層の洗掘現象に関する実験的研究, 第 26 回水理講演会論文集, 82-92.

---

\* 土壌特別 I 最終報告 (未刊)

## 第9章 底泥の飛び出し量

### 第9.1節 概説

第8章で、底泥の限界掃流力を実験的に定式化することができたので、この章では、次の段階として、底泥の飛び出し量について考察する。飛び出し量の定義は、単時間・単位面積あたりに底面表面から離脱する底泥の質量であり、次元は  $[ML^{-2}T^{-1}]$  である。底泥の流送問題の分野では「飛び出し」という言葉は一般的でなく、「巻き上げ」とか「浮上」とかいう言葉がよく用いられる。しかし、砂粒との統一性を考慮して、ここでは底泥の離脱の現象を「飛び出し」と表現する。飛び出し量の評価の方法としては、限界掃流力の場合と同様、床面での底泥を一相の連続体として取り扱う方法と、底泥を何らかの大きさ、形状をもった粒状体の集合として取り扱う方法とがある。

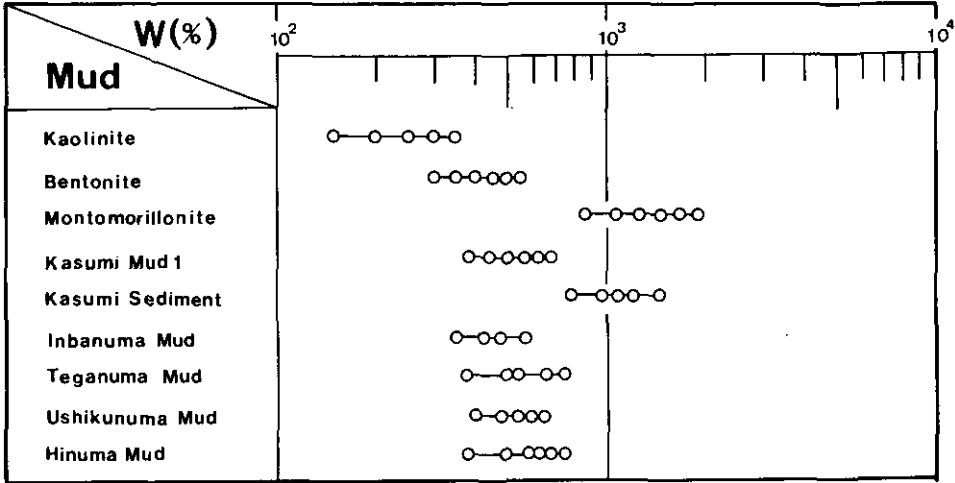
底泥の飛び出し量に関する研究は少なく、実験的にも個々の実験条件について求められている程度である<sup>1),2),3),4)</sup>。飛び出し量に関する理論的な研究としては、Partheniades<sup>2)</sup>と細井<sup>5)</sup>の研究がある。Partheniadesは、底泥の飛び出しを粒状体として取り扱い、せん断応力の変動を考え、粒子の飛び出す確率を求め、理論式が実験値によく合うとした。しかし飛び出し時の条件や飛び出しに要する時間を実験値に合うように決めた点に問題が残る。細井は、底泥の飛び出し量を、連続体モデルで考えた。Einstein & Liの粘性底層の発達・崩壊モデルを、水流層と泥層にそれぞれ考えて、泥層に浮上層厚となるものを導いた。しかし $l$ は流動層厚と考えるべきものであり、それと飛び出し率を結びつけるには解決すべき問題が多い。これは、密度流において、界面上・下層の流れが解析されたからといって、すぐには連行係数を評価できないことに対応している。

底泥の飛び出し量を研究するにあたって、実験データの集積が急務であった。そのため、三種類の粘土と六種類の現地泥について、含水比の条件を変えて飛び出し量を求めた。前述の二つの方法に基づいて飛び出し量を整理した結果、今回の実験条件においては、底泥の飛び出し量は粒状体としての取り扱いが適当であると結論づけた。さらに、底泥粒子の初期移動において滑動についての運動方程式を考え、それに基づいて飛び出し率の推定式を求め、実験結果とも比較して良好な一致をみた。

### 第9.2節 飛び出し量の実験

飛び出し量を求めた底泥の種類と含水比の条件を、表9-1に示す。表中の○印の含水比条件で実験を行った。飛び出し量の実験においては、移動床部は長さ90 cm×幅5 cm×深さ1.5 cmと

表 9-1 飛び出し量を求めた底泥の種類と含水比条件  
 Table 9-1 List of muds and clays used in the hydraulic experiment for the pick-up rate and the water content condition in percent of dry weight for the experiment



して、所定の含水比の試料を直接河床に敷きつめた。流量の増加方法などは、限界掃流力の実験の場合と同様であるが、途中でバルブを停止することはなかった。飛び出し量はレーザー濃度計により計測した。レーザー光線の方向は水路横断方向で水平とした。濃度計の出力と濃度の関係はあらかじめ求めておき、実験中に採水を行ってその関係をチェックした。水路を流下した水は系外へ排水して、移動床の前では常に清水の条件とし、飛び出した底泥は移動床部に沈降・停止することがないため、濃度計の出力の低下は移動床部での飛び出し量に対応している。

流量を漸次増加させる測定法を用いたため、解析は30秒間もしくは60秒間の平均濃度と平均底面せん断応力との関係を求めた。飛び出し量  $P_m$  ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ) は

$$P_m = \frac{A_f U_m C}{B} \quad (9-1)$$

で与えられる。ここで  $A_f$  は水路断面積、 $U_m$  : 断面平均流速、 $C$  : 断面平均重量濃度、 $B$  : 移動床部面積である。

実験は各底泥に対して、原則として六通りの含水比条件で三回ずつ行なった。底泥を敷いた後直ちに実験を行い、圧密等の影響は無視した。

### 第9.3節 実験結果の概要

図9-1の一連の図は、飛び出し量  $P_m$  とせん断応力  $\tau$  の関係である。各底泥ごとにまとめてあ

る。全ての底泥において、含水比が高いほど同一の $\tau$ に対する $P_m$ が大きくなる。ベントナイトの含水比 $w = 300, 350\%$ を除いて、 $P_m$ と $\tau$ の関係は、両対数紙上でかなり急な勾配となっている。この関係は、砂粒の場合の比較的掃流力が小さい領域における飛び出し率 $\rho_s$ と $\tau$ の関数に類似している。

図中の\*印は、 $\tau > \tau_{c2}$ の結果である。各底泥とも、 $\tau < \tau_{c2}$ では、 $w$ が大きいほど $P_m$ と $\tau$ の関係が若干急になる傾向がある。 $\tau > \tau_{c2}$ の状態では、河床に凹凸や亀裂が生じ、流れが河床に平行に作用しなくなって、付加せん断応力が大きくなる。 $w$ が低い条件では、今回の $\tau$ の範囲では破壊が起こらないこともあった。低含水比のベントナイトにおいて、 $P_m \propto \tau$ が成立している状況は、不

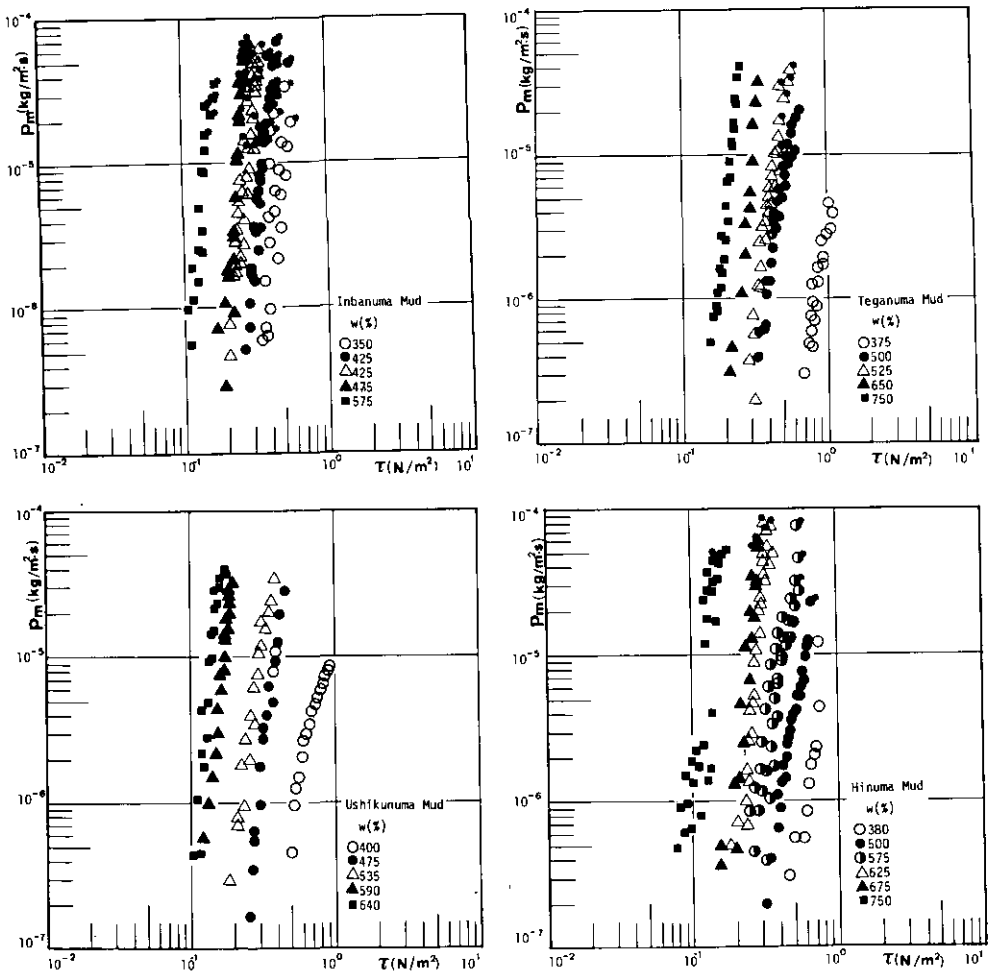


図 9-1 底泥の飛び出し量と剪断力の関係

Fig. 9-1 Relationships between the pick-up mass of mud particle and the shear stress

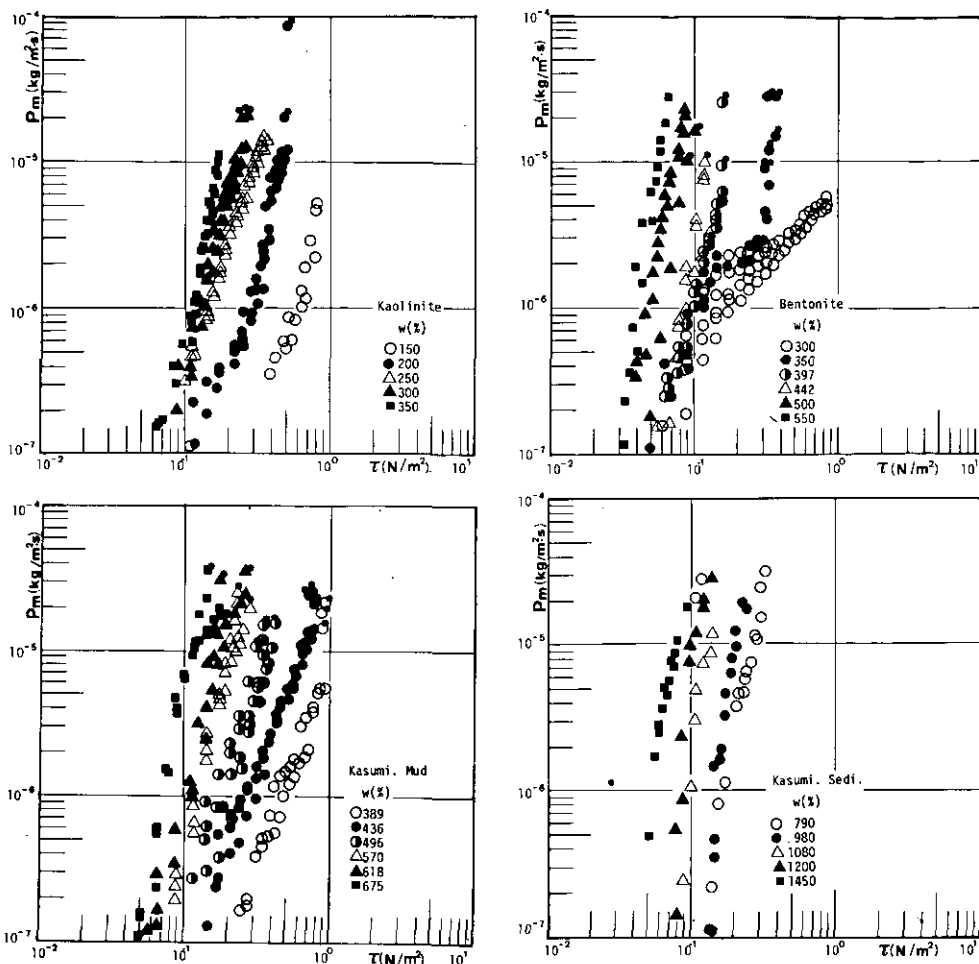


図 9-1 (つづき)  
Fig. 9-1 (Continued)

鮮明な界面から微細粒子が一様に連続的に巻き上がっていた。表面付近のごく薄い層は内側より含水比がかなり高くなっていると推測される。

#### 第 9.4 節 連行係数<sup>6)</sup>

底泥を連続体と考え、底泥の巻き上げ現象を密度流の界面の混合現象のアナロジーとして捉える考え方がある。しかし、底泥の場合、相対密度がモンモリロナイトの 0.027~0.063、霞ヶ浦沈降物の 0.033~0.053 を除いて、0.1 程度と大きいこと、相対粘度  $\eta/\mu$  が 50 から 1000 と非常に大きい点、さらに同一密度でも底泥の種類により粘度が異なる点が、普通の密度流と異なる。図 9-1 の結果を連行係数によって整理したのが図 9-2 である。 $P_m/\rho_t$  ( $\rho_t$ : 底泥を連続体とみた見

かけの密度)が、底泥の連行速度となるので、摩擦速度  $u_*$  で除して次式で連行係数  $E$  を定義した。

$$E = \frac{P_m}{u_* \rho_t} \quad (9-2)$$

横軸の  $F_i'^2$  は、せん断応力  $\tau$  を代表値にとった内部フルード数の2乗値で、

$$F_i'^2 = \frac{\tau}{(\rho_t - \rho) g h_u} \quad (9-3)$$

である。ここで  $h_u$  は上層水深で5 cmである。 $E$  と  $F_i'$  の関係を

$$E \propto F_i'^{\alpha_1} \quad (9-4)$$

で表現すれば、 $\alpha_1 = 8$  となり、通常密度流界面で得られる  $\alpha_1 = 3$  に比べてかなり大きい。また比例定数も底泥の含水比によって異なり普遍表示されない。

内部フルード数として  $(\tau - \tau_{c1})$  を代表値とした場合の結果の一例を、図9-3に示す。横軸  $F_i'^2$  は

$$F_i'^2 = \frac{\tau - \tau_{c1}}{(\rho_t - \rho) g h_u} \quad (9-5)$$

で定義される値である。 $E$  と  $F_i'$  の関係を

$$E \propto F_i'^{\alpha_2} \quad (9-6)$$

で表現すれば、 $\alpha_2 = 2 \sim 4$  となるが比例定数はやはり含水比によって異なる。

式(9-4)、式(9-5)の分母の  $h_u$  は代表的長さで、 $h_u$  のほかに泥層厚や代表粒径なども考えられるが、結果は全てのデータが横方向に平行移動するだけであり、含水比の違いによる比例定数のバラツキは改善されない。図9-4は、各底泥の粘度  $\eta_1$  が0.3 Pa·sに近い条件のものを選んで、 $E$  と  $F_i'^2$  の関係を示したものである。粘度が同一でも、比例定数は底泥によって異なっており、これは粘度が  $\rho_t$  だけでは一義的に決まらない事実を反映している。

内部フルード数の分母は混合に抵抗する項と考えられるが、底泥の場合粘性抵抗が支配的と考えられるので、 $(\rho_t - \rho) g h_u$  に換えて  $\tau_{c1}$  を取り上げ、 $E$  と  $(\tau - \tau_{c1})/\tau_{c1}$  との関係を見たのが図9-5である。図9-2、図9-3に比べて、含水比の違いによるバラツキが改善されたが、それでも  $E$  と  $(\tau - \tau_{c1})/\tau_{c1}$  で、 $P_m$  が規定できるまでには至らなかった。

現象的にも、50あまりの実験ケースのなかで、内部波が観察されたのはベントナイトの2ケ-

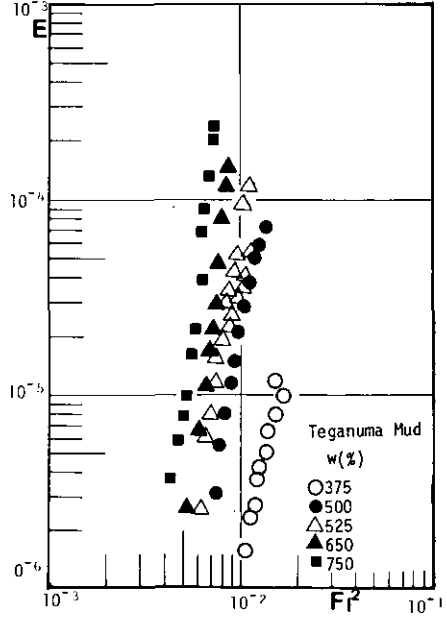
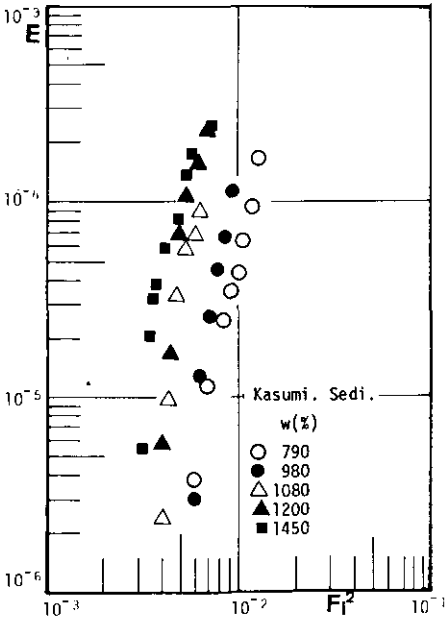
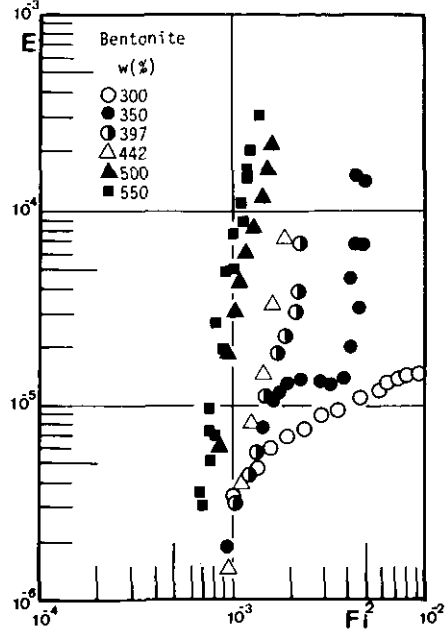
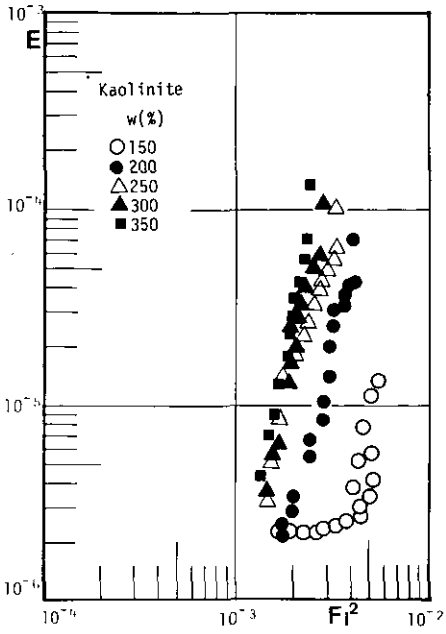


図 9-2 底泥の飛び出し量の連行係数表示 (I)  
 Fig. 9-2 Expressions of the pick-up mass of mud by use of the entrainment coefficient  $E$  (Relationships between  $E$  and  $\tau/(\rho_s - \rho)gh_u$ )



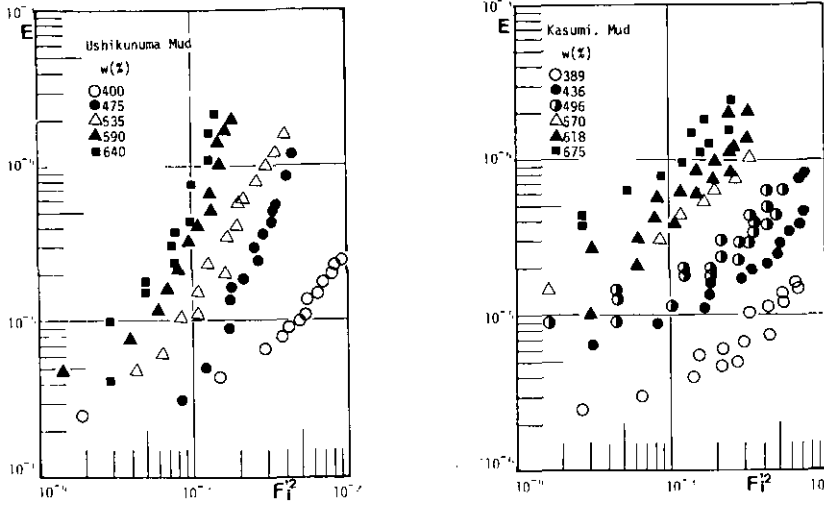


図 9-3 底泥の飛び出し量の連行係数表示 (II)

Fig. 9-3 Expressions of the pick-up mass of mud by use of the entrainment coefficient  $E$  (Relationships between  $E$  and  $(\tau - \tau_{cl}) / (\rho_t - \rho) gh_u$ )

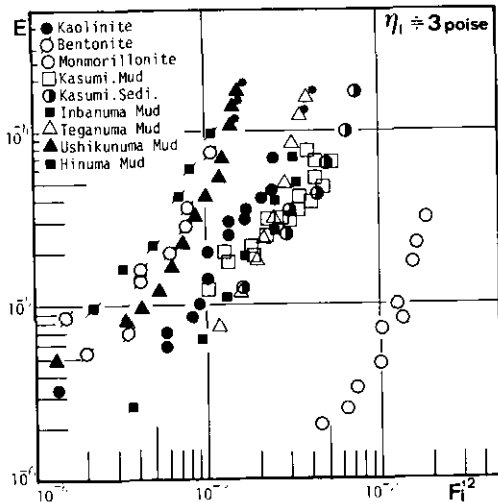


図 9-4 底泥の粘度が等しい条件での連行係数  $E$  と内部フルード数  $F_i'^2$  の関係

Fig. 9-4 Relationships between the entrainment coefficient  $E$  and the Internal Froude Number  $F_i'^2$  on the same mud viscosity condition

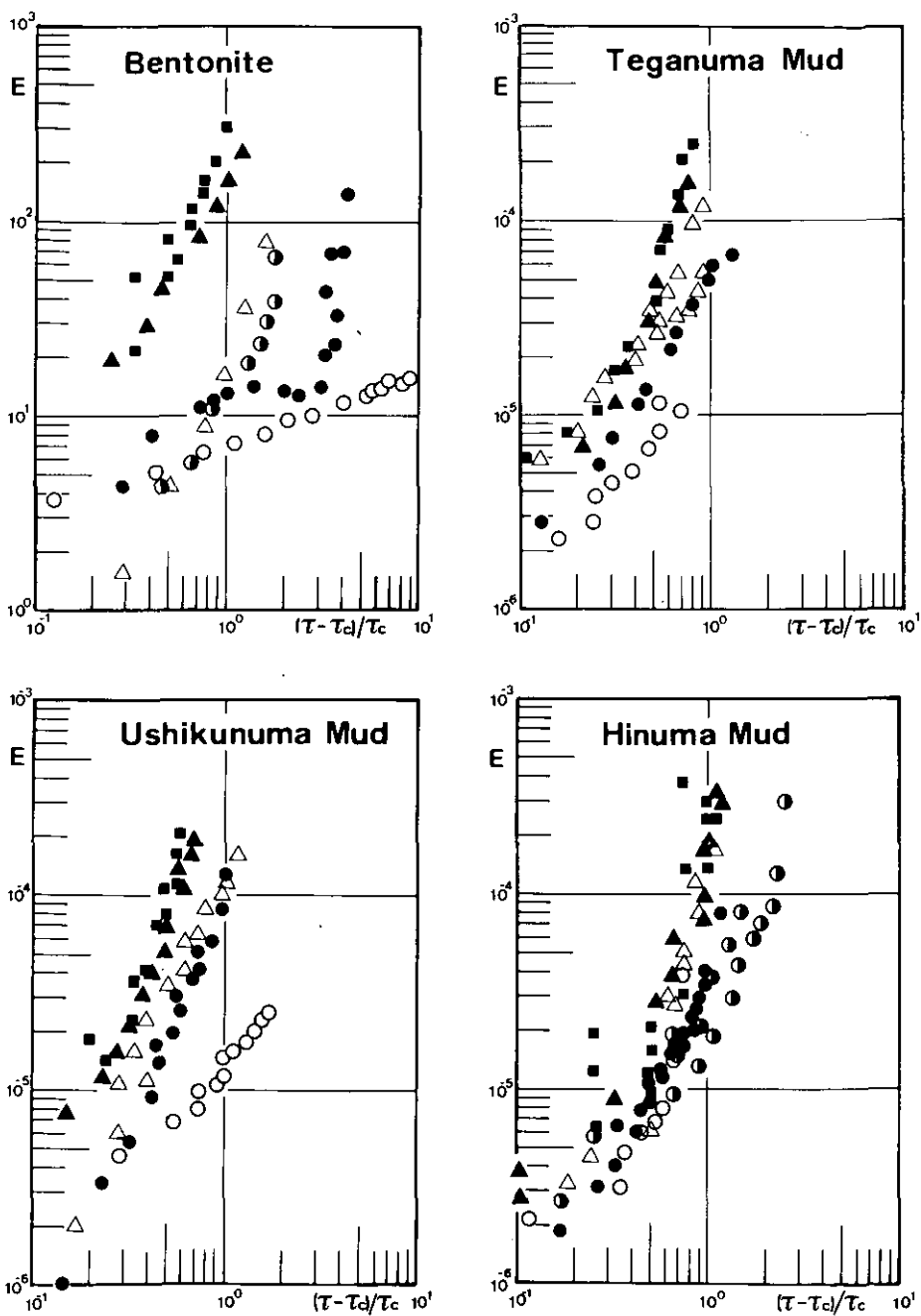


図 9-5 連行数  $E$  と  $(\tau - \tau_c) / \tau_c$  の関係  
 Fig. 9-5 Relationships between the entrainment coefficient  $E$  and  $(\tau - \tau_c) / \tau_c$

スのみで、河床自体の流動が観察されたのはベントナイトの4ケースのほかは、 $\eta < 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ での3ケースのみであった。内部波が観察されないからといって、連続的な取り扱いが不適当というわけではないが、少なくとも通常の連行係数表示では、底泥の飛び出し量は規定できない。底泥の粘度や降伏値を含んだ形に改良する必要があるだろう。

## 第9.5節 無次元飛び出し率

### 9.5.1 飛び出し率と掃流力に関する無次元量

底泥の飛び出し現象において、底泥を粒状体の集合とみて、まず砂粒の移動現象との類似点および相異点について考察する。砂粒の場合、流送される量は流砂量として評価されることが多く、流砂量式として数多く提案されている<sup>7)</sup>。流砂量は、ある断面を単位時間に通過する量で、飛び出し率と移動距離(step length)を掛け合わせたものに比例する量である。砂粒の場合、step lengthが粒径の100倍程度と非常に短いため直ちに平衡状態に対し、局所洗掘などの場合を除いて、流砂量はその地点のせん断応力と結びつけられることが特徴である。

底泥の場合 step length は非常に長くなり、河道では平衡状態に達する前に流れが変化してしまう可能性が高い。また、湖沼などの場合には、むしろ浮遊時間(suspensional period)を定義したほうがよいと思われる。そのため底泥の場合、平衡状態量としての流泥量より飛び出し率のほうが重要となる。

砂粒の飛び出し率の推定式としては、中川・辻本の式がよく知られている<sup>8),9)</sup>。自然砂( $\sigma/\rho = 2.65$ )に対する pick-up rate  $p_s$ の推定式は、次式で与えられる。

$$p_s \sqrt{d/(\sigma/\rho - 1)g} = 0.03 \tau_* \{1 - (\tau_{*c}/\tau_*)\}^3 \quad (9-7)$$

ここで、 $d$ : 砂粒径、 $\tau_*$ : 無次元掃流力( $=\tau/sgd$ ,  $s = \sigma - \rho$ )、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力で0.035である<sup>9)</sup>。

底泥の飛び出し率についても式(9-7)のような無次元推定式を求めることが目的である。そのための第一段階として、次元解析的考察によって実験結果の無次元表示を試みた。

$P_m$ の無次元表示は、砂粒の場合と同様に考えれば

$$p_{m*} = \frac{A_2}{A_3} \frac{P_m}{\rho_0 d_0} t_0 = p_m t_0 \quad (9-8)$$

となる。ここで、 $A_2$ 、 $A_3$ はそれぞれ粒子の面積、体積に関する形状係数、 $\rho_0$ は飛び出す際の代表的粒子の密度、 $d_0$ はその粒径である。 $t_0$ は基準時間、 $p_m$ は単位時間あたりに粒子が飛び出す確率で、次元は $[\text{T}^{-1}]$ である。

せん断応力の無次元表示には少し検討を要した。砂粒の無次元せん断応力 $\tau_{*}$ は、 $\tau/sgd$ で定義

される。これは、砂粒の流送抵抗が重力帰因であるためである。底泥の場合、粘着力が移動抵抗として主要なものであるが、それをどのように表わすかが問題となる。

第8章で述べたように、底泥の場合には二つの限界掃流力を提案した。底泥の飛び出し率を考える際どちらの限界値を用いたらよいか問題となった。著者は、最終的には $\tau_{c2}$ という結論に至ったわけであるが、流れを平均的量だけで評価すると、 $\tau_c = \tau_{c2}$ とした場合、 $\tau < \tau_{c2}$ で底泥が飛び出すことになり一見したところ不自然である。現象的には、流送限界のほうが砂粒の移動限界とも対応し、 $\tau < \tau_{c1}$ で $P_m = 0$ 、 $\tau > \tau_{c1}$ で $P_m$ を定義するというのは合理的に思われる。砂粒の流砂量 $q_b$ や pick-up rate  $p_s$ の推定式でも

$$q_b \text{ or } p_s \propto \tau^{n_1} (\tau - \tau_c)^{n_2} \quad (n_1, n_2; \text{定数}) \quad (9-9)$$

なる表示がなされ、 $q_b$ 、 $p_s$ は $\tau > \tau_c$ で定義される。また、従来の底泥の飛び出し率の実験結果も、式(9-9)の形で整理されており、 $P_m$ を $\tau > \tau_c$ で考えている。著者も、当初は $\tau_c = \tau_{c1}$ と考えて底泥の飛び出し現象を捉えた。そして、 $\tau_{c1}$ を無次元化するための適当な粘着力指標がないため、 $\tau_{c1}$ 自体をその指標と考えて、 $\tau^* = (\tau - \tau_c) / \tau_c$ なる無次元量を定義した。 $\tau_{c1}$ と $\tau_{y1}$ の関係は式(8-4)で与えられ、両辺の次元が一致しないので、 $\tau_{y1}$ は $\tau_{c1}$ の無次元化の指標には用いられないと判断した。

### 9.5.2 基準時間

砂粒の離脱の研究では、基準時間として、Einstein<sup>10)</sup> や辻本<sup>11)</sup>は粒子の沈降速度に関するものを、Paintel や早川は摩擦速度や局所流速で粒径程度移動するのに要する時間を採用している<sup>11)</sup>。前者は、基準時間を「流れによらぬ特性時間」と考えたのに対し、後者は「流れも含んだ砂粒の追従性を示す特性時間」と考えた。いずれにしても、水中における粒子の移動に関する「時定数」のような概念である。

前者の考え方に基づいて底泥の離脱に関する特性時間を評価すると、次元解析的考察により、

$$t_0 = \frac{\nu_1}{(\rho_0/\rho - 1)gd_0} \quad (9-10)$$

となる。ここで、 $t_0$ ：基準時間、 $\nu_1$ ： $\eta_1/\rho_1$ 、 $\rho_1$ ：底泥の見かけ密度である。 $t_0$ は、代表粒子が周辺から粘度 $\eta_1$ に比例する粘性抵抗を受けた時に、粒径分沈降するのに要する時間に比例する量である。

一方、後者の立場に立って、 $t_0$ を局所流速 $u_d$ を含んだ特性時間を考えると、

$$t_0 = \frac{d_0}{v_0} = \frac{d_0}{u_d} \frac{\eta_1}{\mu} \quad (9-11)$$

となる。式(9-11)では、粒子移動速度 $v_0$ が $n_d\mu/\eta_1$ に比例すると仮定した。ここで $u_d$ は粒子の

代表的位置の局所流速である。

9.5.3 代表密度・代表粒径<sup>6)</sup>

図9-6 (a)は、代表密度と代表粒径の概念を示す。 $d_m$ の粒子の幾つかが何らかの力で結合して、粒径 $d_0$ 、密度 $\rho_0$ の粒状体として結合している。比較として、図9-6 (b)は連続体と考えた場合で、平均粒径 $d_m$ 、真密度 $\sigma$ の微粒子が分散しており、見かけの密度が $\rho_t$ となる。いま、河床における代表粒子の充填構造を単純立方体充填と仮定し、その間げきは水で満たされているとすると $\rho_0$ は、

$$\rho_0 = \frac{1}{A_3} (\rho_t - \rho) + \rho \tag{9-12}$$

で与えられる。式(9-12)によれば、 $\rho_0$ は粒径に無関係に評価される。 $A_3$ は粒子が球形であれば $\pi/6$ 、立方体であれば1で、その場合 $\rho_0 = \rho_t$ となる。

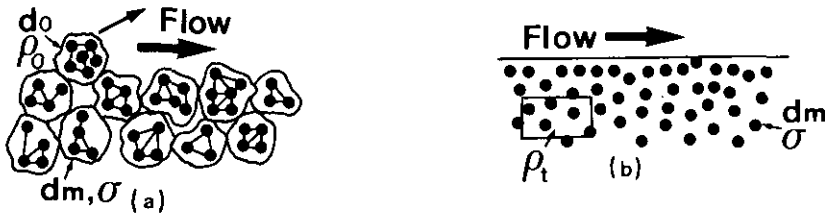


図 9-6 飛び出し時の底泥の代表密度  $\rho_0$  と代表粒径  $d_0$  のモデル  
 Fig. 9-6 Schematic model of the representative density  $\rho_0$  and diameter  $d_0$  for the picking-up mud particle

$d_0$ の評価については、次のように考えた。いま、体積 $l^3$ の立方体を考える。 $l^3$ 中の底泥の実質体積 $V_s$ は、次式で表される。

$$V_s = \frac{\rho}{\rho + \sigma(w/100)} l^3 \tag{9-13}$$

よって、 $l^3$ 中に存在する平均粒径 $d_m$ の底泥の粒子の個数 $n_d$ は、

$$n_d = \frac{\rho}{\rho + \sigma(w/100)} \frac{1}{A_3} \left( \frac{l}{d_m} \right)^3 \tag{9-14}$$

しかし、粒径 $d_m$ の粒子 $n_d$ 個を単純立方体充填すれば、図9-7 (a)のようになり、体積 $l^3$ を満たすことができない。そこで図9-7 (b)のように、 $n_d$ 個の粒子で $l^3$ の体積を単純立方体充てんで満たすことができる粒径を求めて、これを代表粒径 $d_0$ とした

$$d_0 = l \frac{1}{nd^2} = \left[ \frac{\rho + \sigma(w/100)}{\rho} \right]^{1/3} A_3^{1/3} d_m \quad (9-15)$$

この方法によれば、代表粒径に含水比、真密度、平均粒径の効果を評価したことになる。

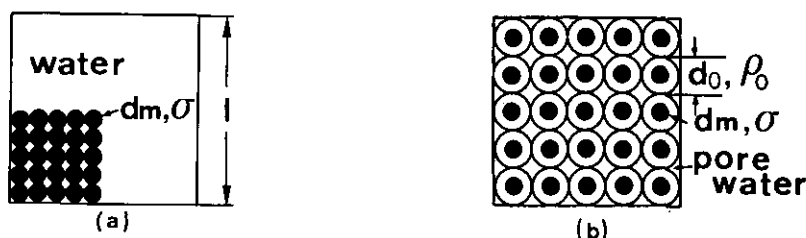


図 9-7 代表粒径  $d_0$  の概念図  
Fig. 9-7 Definition of the representative diameter  $d_0$  for the picking-up mud particle

#### 9.5.4 飛び出し率の無次元表示

基準時間として、式(9-10)で与えられる  $t_0$  を用いると、式(9-8)は結局、

$$p_{m*} = \frac{A_2}{A_3} \frac{P_m \nu_1}{\rho_0 (\rho_0 / \rho - 1) g d_0^2} \quad (9-16)$$

となる<sup>6)</sup>。 $\rho_0$ 、 $d_0$ として、式(9-10)、式(9-15)を用いたときの無次元飛び出し率を  $p_{m*1}$  とする。図9-8に4種類の底泥について  $p_{m*1}$  と  $\tau_*^*$  の関係を示した。各底泥ごとに、 $p_{m*1}$  と  $\tau_*^*$  が  $w$  によらずほぼ1つの関係式で表わされる。残り五つの底泥も同様の結果を示した。 $p_{m*1}$  と  $\tau_*^*$  の関係は、

$$p_{m*1} = C_{p1} \tau_*^{*2} \quad (C_{p1}: \text{比例定数}) \quad (9-17)$$

となる。図9-9は、 $p_{m*1}$  と  $\tau_*^*$  の関係を式(9-16)で表したときの各底泥の代表的直線を示したものである。底泥により  $C_{p1}$  の値がかなり変化することがわかる。モンモリロナイトは比例定数が最大となったが、これは分母にある  $d_0$  に  $d_m$  が含まれており、それが2乗できくためである。

流送実験中の観察では、飛び出す底泥粒子径は、微細径から数  $100 \mu\text{m}$  まで混在して、底泥の種類や含水比による違いが明確でなかった。そこで、いま仮に代表粒径を一定として便宜的に  $d_0 = 60 \mu\text{m}$  として、 $p_{m*2}$  を計算し、各底泥の  $p_{m*2}$  と  $\tau_*^*$  の関係を求めたところ図9-10となった。各底泥において、 $d_0 = 60 \mu\text{m} = \text{const.}$  としても含水比の違いによるバラツキは図9-8と同程度であった(図9-11参照)。このことは、 $d_0$  の評価について、同一底泥ならば含水比の影響は無視できることを示唆する。図9-10は比例定数が現地泥グループと粘土グループでは10倍近く異なっ

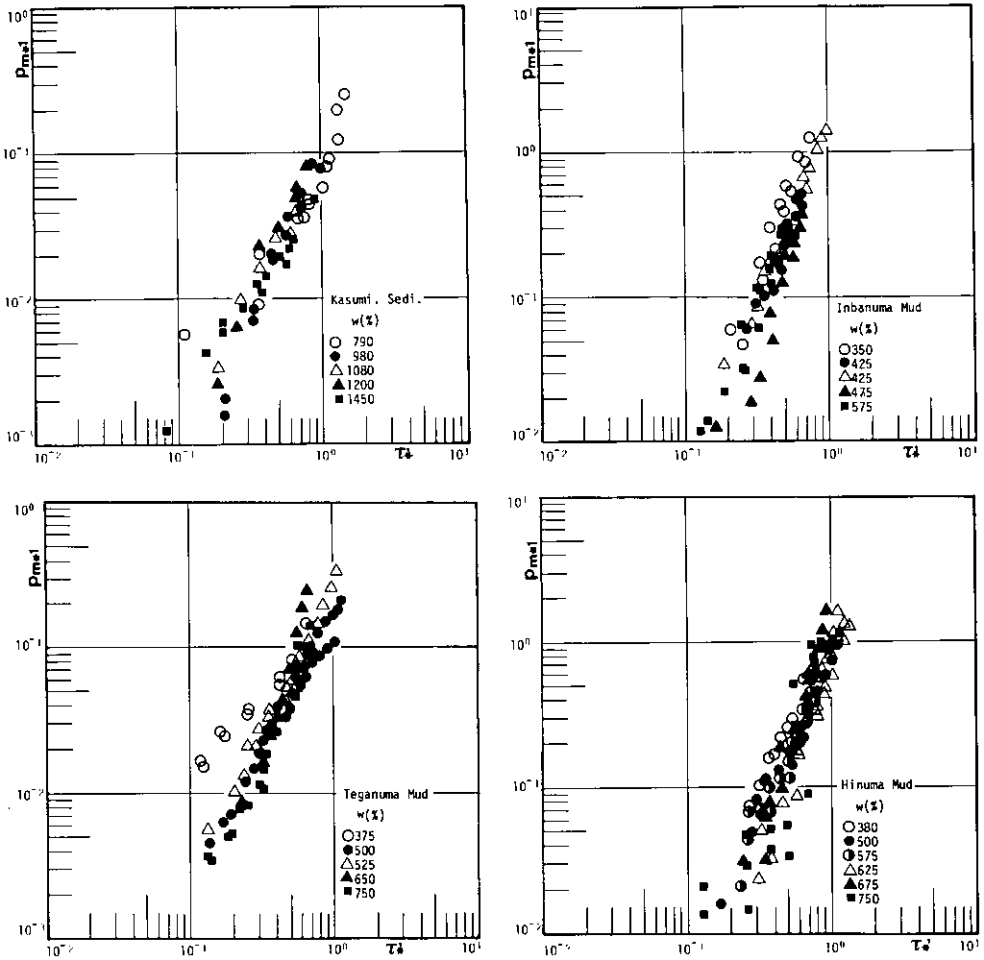


図 9-8 無次元飛び出し率  $p_{m*1}$  と無次元掃流力  $\tau_*'$  の関係  
 Fig. 9-8 Relationships between the non-dimensional pick-up rate  $p_{m*1}$  and the non-dimensional shear stress  $\tau_*'$ .

たが、各グループ間では比較的まとまった値となった。

底泥の種類による関係式の違いは図9-10のほうが少ないが、 $d_0=60\mu\text{m}$ は便宜的な値であるし、現地泥と粘土のグループに分かれる理由も明確でない。またベントナイトは、第4, 5, 8章では別のグループに分類されたが、 $p_{m*2}$ に関してだけ他の粘土と同じグループに入るというのも理由が不明確である。図9-9の比例定数のバラツキは、 $d_m$ が分母に2乗できているためである。底泥の場合、 $f_0$ を式(9-10)で評価するのが適当であるか否かの問題があり、 $f_0$ を式(9-11)で評価すれば、 $p_{m*}$ は、

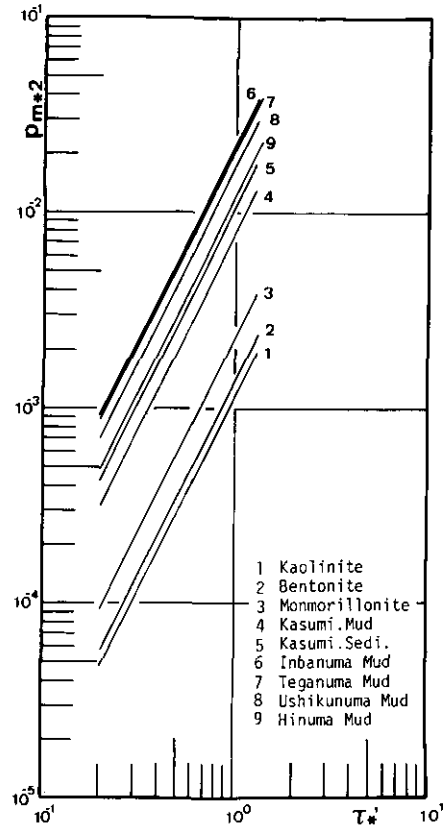
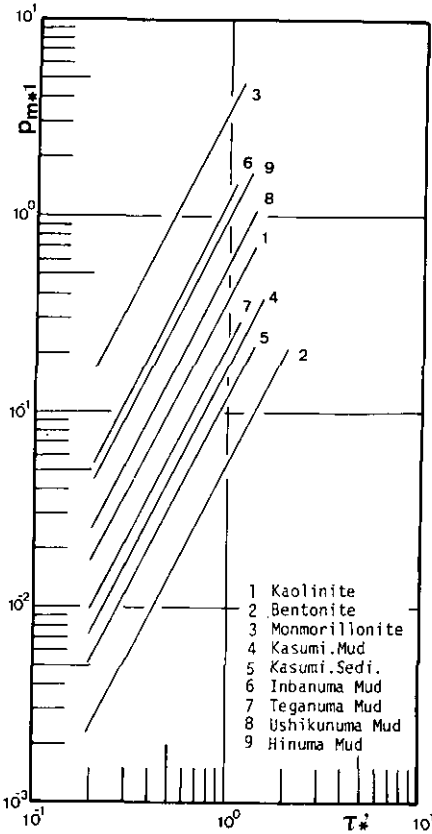


図 9-9 底泥による無次元飛び出し率  $p_{m*1}$  の違い

Fig. 9-9 Lines showing the relationship between  $p_{m*1}$  and  $\tau_*$  for each mud

図 9-10 底泥による無次元飛び出し率  $p_{m*2}$  の違い

Fig. 9-10 Lines showing the relationship between  $p_{m*2}$  and  $\tau_*$  for each mud

$$p_{m*} = \frac{A_2}{A_3} \frac{P_m}{\rho_0} \frac{\nu_t}{u_d} \quad (9-18)$$

となり、式の上では  $d_0$  の因子は消える。しかし、 $u_d$  の評価の際に  $d_0$  の因子が現れる。式(9-18)の考え方は、次の  $p_{m*}$  の理論的考察に受け継がれる。

図9-8から図9-11までの結果は、基準時間  $t_0$  に粘度  $\eta_1$  を用いることにより、同一底泥においては飛び出し率が含水比によらず実験的に規定できることがわかった。また、同一底泥では  $d_0$  は含水比の影響が無視できることもわかった。特に、粘度  $\eta_1$  が重要な因子となるという結果は、次に述べる底泥粒子の初期移動の運動方程式を構築する上でも大きな基礎となる。



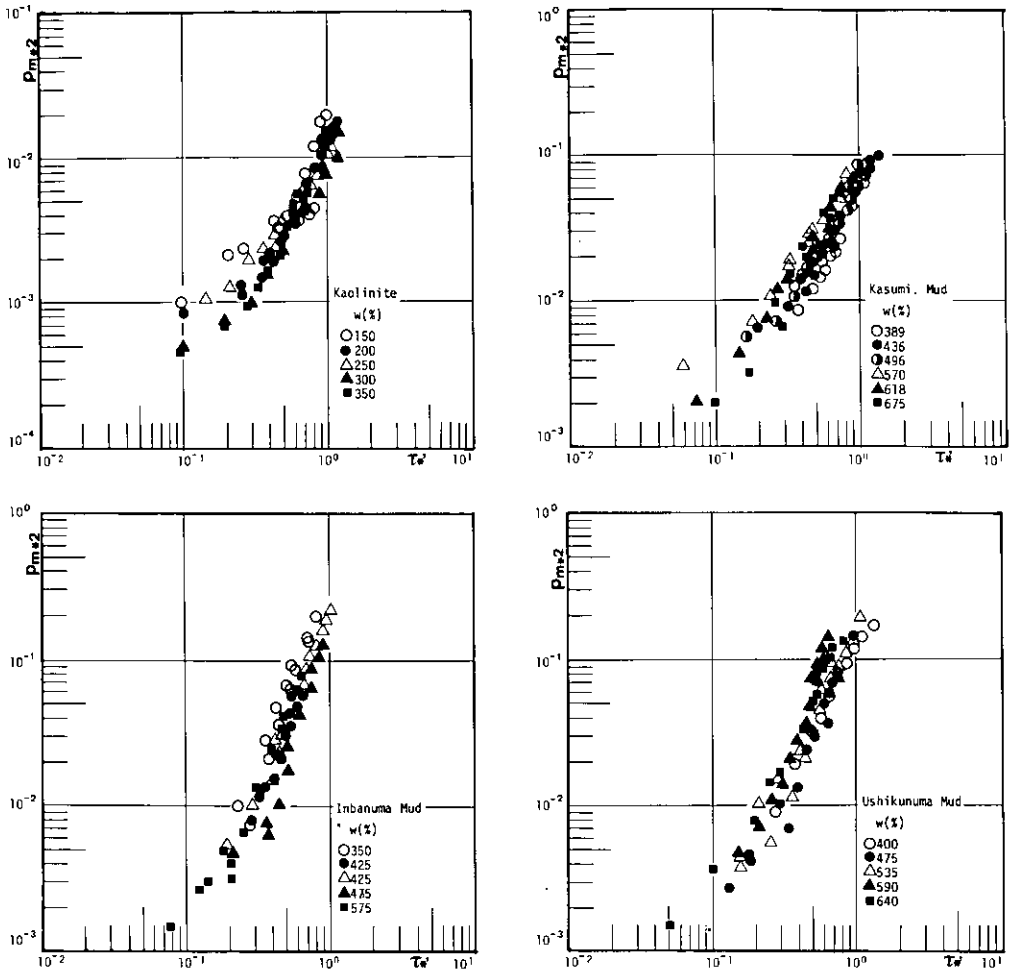


図 9-11 無次元飛び出し率  $p_{m*2}$  と無次元掃流力  $\tau_*'$  の関係

Fig. 9-11 Relationships between the non-dimensional pick-up rate  $p_{m*2}$  and the non-dimensional shear stress  $\tau_*'$

## 第9.6節 飛び出し率に関する理論的考察

### 9.6.1 底泥粒子の運動方程式

第9.5節で、粘度  $\eta_1$  が  $P_m$  を支配する重要な因子であることがわかった。粘度は物質が流動したときに関与する量であるので、第9.5節の結果は、飛び出し率に対して、底泥粒子が静的な力の均衡が破れたとき瞬間的に動くという解析では不適当であり、粒子の離脱が時間のかかる現象であり、運動方程式に基づく評価が必要であることを示唆している。中川・辻本<sup>9)</sup>は、砂粒子の河床からの離脱率の推定式を粒子の回転に関する運動方程式に基づいて求めている。砂粒の初期移動機構を転動離脱として捉え、回転に関する運動方程式から砂粒が転動離脱に要する時間  $T_d$  を評価した。さらに、砂粒を移動させることができる流体力の持続時間  $p_0 \hat{t}_0$  を考え、その時間内に離脱する個数を  $p_0 \hat{t}_0 / T_d$  で定義し、飛び出し率  $p_s$  を推定した。ここで  $p_0$  はせん断応力に変動を考え  $\tau > \tau_c$  なる確率であり、 $\hat{t}_0$  は比重  $\sigma/\rho$ 、粒径  $d$  の砂の初期移動を考える場合の変動を包摂する時間単位である。

底泥の飛び出し率を推定するにあたって、底泥を何らかの形状・大きさを持った粒子の集合体として捉えるならば、砂粒の場合と同様な考え方が適用できる。相異点は、底泥の場合抵抗力が重力でなく粘着抵抗であること、高粘性のため慣性が無視でき移動直後に平衡速度に達すると考えられること、さらに初期移動形態が転動ではなく第8.5節で示した理由により滑動離脱であることなどである。

さて、図9-12に示される状態の粒子Aが、流れから力を受け、河床面に沿って滑動で離脱するものとする。粒子Aには、抗力  $D$  と粘性抵抗力  $R_v$  が作用すると考え、揚力と水中重量による抵抗力は無視する。粒子Aの流れ方向の運動方程式は次式で与えられるとする。

$$A_3 (1 + C_M) (\rho_0 - \rho) d_0^3 \frac{dv}{dt} - k_3 A_1 \mu (u_d - u_c) d_0 + k_4 A_1 \eta v d_0 = 0 \quad (9-19)$$

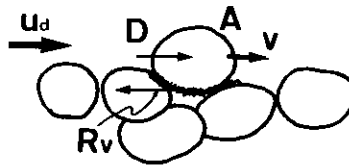


図 9-12 記号図  
Fig. 9-12 Figure for explanation of symbols

ここで、 $A_3$ ：体積に関する形状形数、 $A_1$ ：抗力および粘性抵抗力に関する形状係数、 $C_M$ ：付加質量係数、 $d_0$ 、 $\rho_0$ ：離脱時の底泥の代表粒径および密度、 $k_3$ 、 $k_4$ ：比例定数、 $v$ ：粒子速

度,  $u_d$ : 粒子近傍の流れの速度,  $u_c$ : 限界流速,  $\eta$ : 底泥の粘度,  $\mu$ : 水の粘度である。左辺第一項は慣性項, 第二項は抗力, 第三項が粘性抵抗力である。式(9-19)を整理すると,

$$\frac{dv}{dt} + k_4 A_0 \eta v = k_3 A_0 \mu (u_d - u_c) \quad (9-20)$$

$$A_0 = \frac{A_1}{A_3} (1 + C_M) (\rho_0 - \rho) d_0^3 \quad (9-21)$$

となる。これを解くと,

$$\frac{v}{v_0} = \{1 - \exp(-k_4 A_0 \eta t)\} \quad (9-22)$$

が得られる。ここで  $v_0$  は,

$$v_0 = \frac{k_3}{k_4} \frac{M}{\eta} (u_d - u_c) \quad (9-23)$$

で与えられる平衡速度である。式(9-22)より, 粒子は移動開始後, 急速に平衡速度に近づくことがわかる。 $k_3, k_4$ の正確な値は不明であるが, 流体力と粘性抵抗力が, 粒子の上下半分ずつに動くと仮定して,  $k_3 = k_4 = 1/2$ とする。

### 9.6.2 底泥粒子の移動速度

初期移動のモデル化において, 粒子の移動速度が, 平衡速度  $v_0$  で近似できるか否かを検討する。粒子が粒径分移動するのに要する時間に比べて,  $v/v_0 = 0.9$  になる時間が十分小さければ,  $v = v_0 = \text{const.}$  と見なしてよいであろう。式(9-22)より,  $v/v_0$  は  $A_0, \eta$  によって変化し, 両値が小さいほど  $v/v_0 = 0.9$  となる時刻  $t_p$  は大きくなる。そこで  $\eta$  の値は, 流送実験の  $\eta_1$  の範囲を考慮して下限値に近い  $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  とした。 $A_0$  の値は, 粒子を球と仮定し,  $\rho_0, d_0$  とし表 8.3 と対応させて二つの条件について式(9-21)より求めた。二つの  $\rho_0, d_0$  の組み合わせに対する  $A_0$  の値と  $t_p$  を表 9-2 に示す。

表 9-2 平衡速度に達する時間  $t_p$  と粒径分移動するのに要する時間  $T_d$   
 Table 9-2 Time  $t_p$  taken to reach the 90% value of the equilibrium velocity and time  $T_d$  taken to move a length of the mud particle's diameter

	$\rho_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	$d_0$ ( $\mu\text{m}$ )	$A_0 \times 10^3$	$t_p \times 10^3$ (sec)	$T_d \times 10^3$ (sec)	$T_d/t_p$
①	2.3	20	2308	0.002	2.34	1670
②	1.2	38	4155	0.001	6.33	6330

一方、式(9-22)より、底泥の移動距離は、

$$x_d = \int_0^t v dt = v_0 \left( t + \frac{\exp(-A_0 \eta t / 2) - 1}{A_0 \eta / 2} \right) \quad (9-24)$$

で与えられる。 $A_0 \eta t / 2 = t_*$ として変形すると、

$$x_* = \frac{A_0 \eta x_d}{2 v_0} - 1 = t_* + \exp(-t_*) \quad (9-25)$$

となる。図9-13は $x_*$ と $t_*$ の関係を示したものである。 $t_* \geq 3$ で $\exp(-t_*) \approx 0$ となることがわかる。底泥粒子は、 $v_0$ が大きいほど、 $d_0$ だけ移動するのに要する時間 $T_d$ が短くなるので、 $u_d$ の最大値で考えれば、最小の $T_d$ が評価できる。 $u_d \approx U_m$ として、 $U_m = 0.6 \text{ m/s}$ とすれば、 $\eta = 0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ のとき、 $v_0 = 6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ となる。式(9-25)に、 $v_0$ と $A_0$ を代入し $x_d = d_0$ として $T_d$ を求め、表9-2に示す。表9-2には $T_d / t_p$ の値も示す。2条件とも $T_d / t_p \gg 1$ となり、底泥粒子の初期移動のモデル化に際しては、粒子は移動開始直後から平衡速度 $v_0$ で移動すると考えてよいことが明らかとなった。

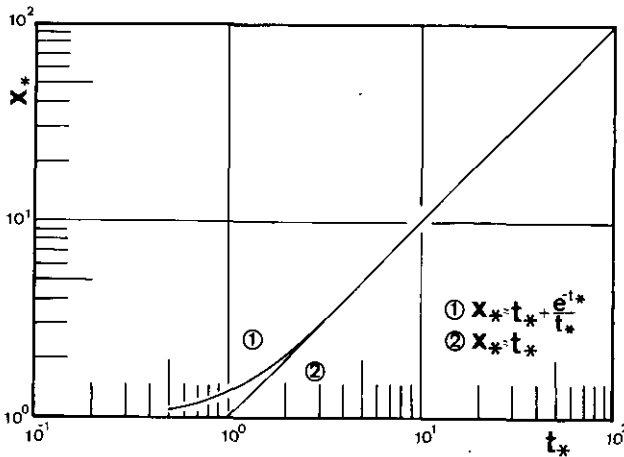


図 9-13 移動距離  $x_*$  と時間  $t_*$  の関係

Fig. 9-13 Relationships between the transfer distance  $x_*$  of mud particle and the time  $t_*$

### 9.6.3 無次元飛び出し率の定式化

底泥は式(9-23)で表される平衡速度で河床から離脱するが、せん断応力は乱れによって変動

している。底泥はかなりの高周波の変動に対しては応答せず、ある程度持続した力にのみ応答する。底泥についても、砂粒の場合と同様に、初期移動を考える場合の変動を把える時間単位を考え、これを $\hat{t}_0$ とする<sup>9)</sup>。そして、 $p_0$ を $\tau > \tau_c$ の確率とすると、 $p_0 \hat{t}_0$ 時間ずつ持続して粒子を離脱させることができるせん断応力が作用すると考える。 $p_0 \hat{t}_0$ 中に底泥粒子が飛び出す個数は、底泥粒子の離脱時間を $T_d$ とすれば、 $p_0 \hat{t}_0 / T_d$ で与えられる。したがって、単位時間当たりの離脱粒子個数を全体の時間に亘って考えると、結局飛び出し率 $p_m$ は次式で求められる。

$$p_m = \frac{p_0 \hat{t}_0}{T_d} \cdot \frac{1}{\hat{t}_0} = \frac{p_0}{T_d} \quad (9-26)$$

$p_m$ の次元は $[T^{-1}]$ で、単位時間当たりの粒子の飛び出す確率である。 $p_0$ は無次元量である。 $p_0$ と $T_d$ を評価できれば、飛び出し率 $p_m$ が推定できることになる。まず底泥の離脱時間について考える。底泥の移動に伴う粒子の接触面積の減少の影響は無視して、離脱する間、粒子の粘度や移動速度は変化しないと考える。底泥の離脱を底泥が $a_1 d_0$ だけ移動した状態と定義すると、底泥の離脱に要する時間は、

$$T_d = \frac{a_1 d_0}{v_0} = \frac{a_1 \eta}{(u_d - u_c) \mu} \quad (9-27)$$

で表される。ここで $a_1$ は定数である。底泥表面は水理学的滑面で、粘性底層内で次の関係が成立するとする。このとき、 $u_d$ 、 $u_c$ は次の2式で与えられる。

$$u_d = \frac{\rho u_*^2}{\mu} a_2 d_0 = a_2 \frac{\tau}{\mu} d_0 \quad (9-28)$$

$$u_c = \frac{\rho u_{*c}^2}{\mu} a_2 d_0 = a_2 \frac{\tau_c}{\mu} d_0 \quad (9-29)$$

ここで、 $a_2$ は定数で $a_2 d_0$ は局所流速 $u_d$ の作用高さを示す。一方、持続時間 $p_0 \hat{t}_0$ の間に作用する力は次のような条件付平均底面せん断応力に等しいと考えられる。

$$E[\tau | \tau > \tau_c]$$

よって、式(9-26)は、

$$T_d = \frac{a_1}{a_2} \eta \frac{1}{E[\tau | \tau > \tau_c] - \tau_c} \quad (9-30)$$

と変形される。

次に底面せん断応力については、中川・辻本らと同様に正規分布するものと仮定する。せん断応力  $\tau$  の確率密度関数を  $p(\tau)$  とすると、

$$p(\tau) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left[-\frac{(\tau-\bar{\tau})^2}{2\sigma_1^2}\right] d\tau \quad (9-31)$$

である。ここで  $\bar{\tau}$  はせん断応力  $\tau$  の平均値、 $\sigma_1$  はその標準偏差である。このとき、 $p_0$  は、

$$p_0 = \int_{\tau_c}^{\infty} p(\tau) d\tau / \int_0^{\infty} p(\tau) d\tau \quad (9-32)$$

で与えられる。いま、 $y = (\tau - \bar{\tau}) / \sigma_1$  とすると、式(9-31)、式(9-32)は次のように書き換えられる。

$$\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) \quad (9-33)$$

$$p_0 = \int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy / \int_{-\frac{1}{\delta_0}}^{\infty} \phi(y) dy \quad (9-34)$$

ここで、

$$y_c = \frac{\tau_c - \bar{\tau}}{\sigma_1} = \frac{1}{\delta_0} \left( \frac{\tau_c}{\bar{\tau}} - 1 \right) \quad (9-35)$$

$$\delta_0 = \frac{\sigma_1}{\bar{\tau}} \quad (9-36)$$

である。またこのとき  $E[\tau | \tau > \tau_c]$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} E[\tau | \tau > \tau_c] &= \int_{\tau_c}^{\infty} \tau p(\tau) d\tau / \int_{\tau_c}^{\infty} p(\tau) d\tau \\ &= \int_{y_c}^{\infty} (y\sigma_1 + \bar{\tau}) \phi(y) dy / \int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy \\ &= \bar{\tau} (1 + \delta_0 y_s) \end{aligned} \quad (9-37)$$

ここで、

$$y_s = \int_{y_c}^{\infty} y \phi(y) dy / \int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy \quad (9-38)$$

である。 $\phi(y)$  は、

$$\frac{d}{dy} \phi(y) = -y \phi(y) \quad (9-39)$$

を満足するので、

$$\int_{y_c}^{\infty} y \phi(y) dy = - \int_{\phi(y_c)}^{\phi(y)} d\phi(y) = \phi(y_c) \quad (9-40)$$

$$\int_{y_c}^{\infty} \phi(y) dy = p_0 - \int_{-\frac{1}{\delta_0}}^{\infty} \phi(y) dy \doteq p_0 \quad (9-41)$$

となり、

$$y_s \doteq \phi(y_c) / p_0 \quad (9-42)$$

が成立する<sup>11)</sup>。よって、ここで改めて  $\tau = \bar{\tau}$  とすれば、結局

$$E(\tau | \tau > \tau_c) \doteq \tau \left\{ 1 + \delta_0 \frac{\phi(y_c)}{p_0} \right\} \quad (9-43)$$

なる関係が得られる。式(9-26)に、式(9-30)、式(9-43)を代入すれば、

$$\frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{\eta p_m}{\tau} \left\{ 1 + \delta_0 \frac{\phi(y_c)}{p_0} - \frac{\tau_c}{\tau} \right\}^{-1} = p_0 \quad (9-44)$$

となる。よって無次元飛び出し率  $p_{m*}$  は、

$$p_{m*} = \frac{\eta}{\tau} p_m = \frac{a_2}{a_1} p_0 \left( 1 + \delta_0 \frac{\phi(y_c)}{p_0} - \frac{\tau_c}{\tau} \right) \quad (9-45)$$

で与えられる。式(9-45)が無次元飛び出し率  $p_{m*}$  の推定式となる。いま、砂粒と同様に  $\delta_0 = 0.5$  と仮定する<sup>12)</sup>。定数  $a_1$ 、 $a_2$  については、粒径分移動した時を離脱と考えて  $a_1 = 1$  と仮定し、 $a_2$  は 0.75 を用いることにする。この値を用いて、 $p_{m*}$  と  $\tau/\tau_c$  の関係を求めたのが、図9-14である。図9-14によれば、 $\tau/\tau_c < 1$  で  $p_{m*}$  は  $\tau/\tau_c$  に対して急勾配で増加しているが、 $\tau/\tau_c > 1$  では、その勾配は急激に低下してゆき、 $p_{m*} = 0.75$  に漸近してゆく。これは、 $\tau > \tau_c$  において、

$$p_0 \doteq 1, \quad E(\tau | \tau > \tau_c) - \tau_c \doteq \tau \quad (9-46)$$

となるためである。これは、 $\tau > \tau_c$  では  $p_m \propto \tau/\eta$  なることを示し、粘性流体のクエット流れ  $u = (\tau/\eta)y$  に対応するものである。

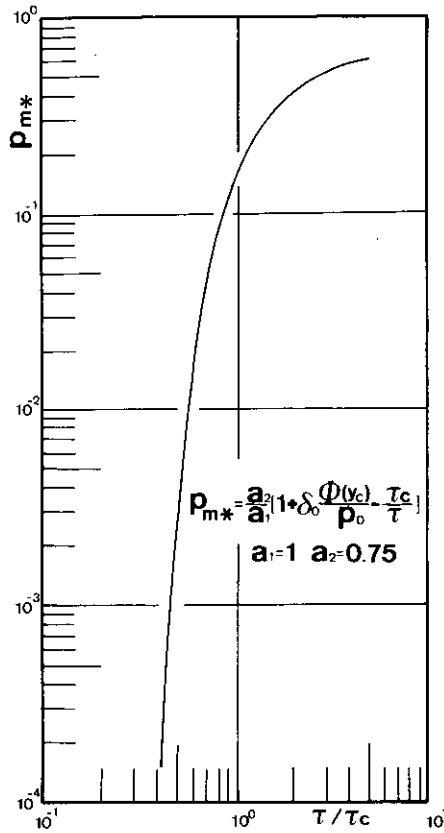


図 9-14 底泥の無次元飛び出し率  $p_{m*}$  の推定式  
 Fig. 9-14 Theoretical curve showing the relationships between the non-dimensional pick-up rate  $p_{m*}$  and the non-dimensional shear stress  $\tau/\tau_c$

#### 9.6.4 無次元飛び出し率の推定式と実験結果との比較

ここまでの議論においては、 $\tau_c$ として何をを用いるべきか言及しなかった。式(9-45)の誘導の過程では、 $\tau_c$ は、 $\tau_{c1}$ でも  $\tau_{c2}$ でも特に支障はない。せん断応力の変動を考慮したことにより、平均底面せん断応力が限界掃流力以下でも、底泥粒子の飛び出しは定義可能となった。

$\tau_{c1}$ と  $\tau_{c2}$ のどちらを  $\tau_c$ として用いるべきかは、実験結果との対応で決められる。飛び出し率の実験結果は、理論曲線の  $\tau/\tau_c < 1$  の範囲での  $p_{m*}$  と  $\tau/\tau_c$  の関係によく対応している。飛び出し率を求めたせん断応力の下限值  $\tau_{min}$  と上限値  $\tau_{max}$  は、それぞれ  $\tau_{min} \leq \tau_{c1}$ 、 $\tau_{max} \geq \tau_{c2}$  であるので、実験値と理論値の対応のよしあしは、 $\tau_{c1} \leq \tau \leq \tau_{c2}$  の範囲で考えなければならない。

いま  $\tau = \tau_{c1}$  とすると、理論曲線の  $\tau/\tau_c > 1$  の範囲での  $p_{m*}$  と  $\tau/\tau_c$  の関係も比較することになる。図9-14において、 $\tau/\tau_c > 1$  の範囲では、



$$p_{m*} \propto (\tau / \tau_c)^{\beta_1} \quad (9-47)$$

としたとき、 $\beta_1 < 2$ であり、かつ  $\tau \gg \tau_c$  に対して  $\beta_1 \rightarrow 0$  となる。実験結果では、 $\tau / \tau_c > 1$  において  $\beta_1 = 4$  となり対応が悪い。

次に  $\tau = \tau_{c2}$  とすると、理論曲線の  $\tau / \tau_c < 1$  の範囲での  $p_{m*}$  と  $\tau / \tau_c$  の関係を実験結果と対応させることになる。飛び出し量  $P_m$  と飛び出し率  $p_m$  には、

$$p_m = \frac{A_3}{A_2} \frac{P_m}{\rho_0 d_0} \quad (9-48)$$

の関係がある。いま、底泥粒子を球と仮定すれば、 $A_2 = \pi/4$ 、 $A_3 = \pi/6$  であり、 $\rho_0$  を式(9-12)で、 $d_0$  を式(9-15)で与え  $\eta = \eta_1$  として  $P_m$  の実験結果を用いて、

$$p_{m*} = \frac{\eta_1}{\tau} \frac{A_3}{A_2} \frac{P_m}{\rho_0 d_0} \quad (9-49)$$

を計算する。この  $p_{m*}$  と  $\tau / \tau_{c2}$  の関係を図9-15に示す。図9-15には、比較のため式(9-45)で与えられる  $p_{m*}$  の推定式も併示した。各底泥とも、推定式と実験結果との整合性がよい。 $\tau_c = \tau_{c2}$  とすれば、式(9-45)は、特別意味の不明な実験定数を導入することなく、底泥の飛び出し率を推定できると考えられる。推定式が若干大きめの値となった底泥もあるが、粒子形状や飛び出し粒径の適切な評価により改善されると考えられる。

底泥の飛び出し量の推定式の特徴は、砂粒の場合には  $p_{s*}$  が  $\tau / \tau_c > 1$  の範囲で定義されるのに対して、底泥の場合には  $p_{m*}$  は  $\tau / \tau_{c2} \leq 1$  の範囲で定義されることである。底泥の場合、 $\tau > \tau_{c2}$  の状態では、底泥は表層全域のみならず下層も流動することになるので、河床が破壊されると流れも河床に平行に作用しなくなり局所的な付加せん断応力が大きくなって、ここで展開した移動機構とは全く異なったものになる。このような状態では、式(9-45)で与えられる  $p_{m*}$  を適用できない。式(9-45)が適用される状況というのは、底泥が全体としては流動化しておらず、ある底泥粒子に  $\tau / \tau_{c2}$  なる状態が離脱時間より長く続いたとき、その粒子が飛び出すというものである。

$\tau_{c2}$  は式(8-5)に示したように、底泥の降伏値  $\tau_{y1}$  にほぼ正比例する値であり、 $\tau / \tau_{c2}$  と捉えることは底泥の限界掃流力が何によって規定されるかという問題を研究する立場からも都合がよい。8.5.4においても、底泥の限界掃流力として、 $\tau_{c2}$  を考えるのが妥当であると結論したが、飛び出し率に関する考察においてもこの結論が正しいことが示された。この考えをさらに進めて、 $\tau_c$  を  $\tau_{y1}$  と直接結びつけることが考えられ、このほうが  $\tau_c$  の意味はさらに明確となる。ただし、8.4.2に述べた理由で  $\tau_{c2}$  は  $\tau_{y1}$  より若干小さい。 $\tau_{c2} < \tau_{y1}$  になる、粘着力が作用している部分は  $\tau_{y1}$  の強度があるとしても、表層では接触面積が小さくなるために平均的にならした応力値としては小さくなることも考えられる。いずれにしても、 $\tau_{c2} = k_2 \tau_{y1}$  と表現したとき、 $k_2 \leq 1$  と考えられ、 $k_2$  の評価が今後検討すべき問題となる。

ここで展開した初期移動モデルは、その他にも検討すべき仮定を含んでいる。離脱時過程中の粒子の接触面積の減少の問題もその一つである。さらに、定数  $\delta_0$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  などの値も

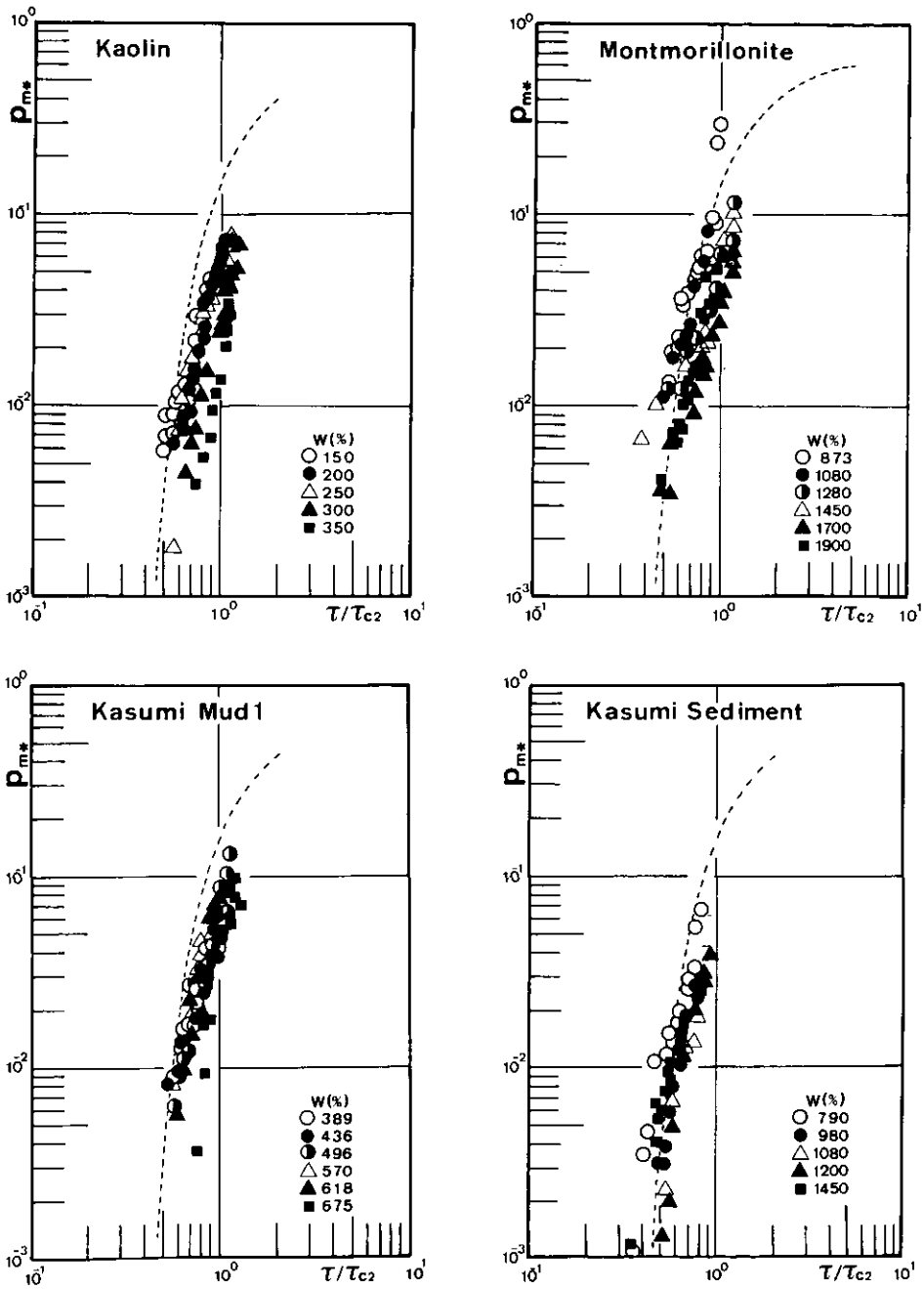
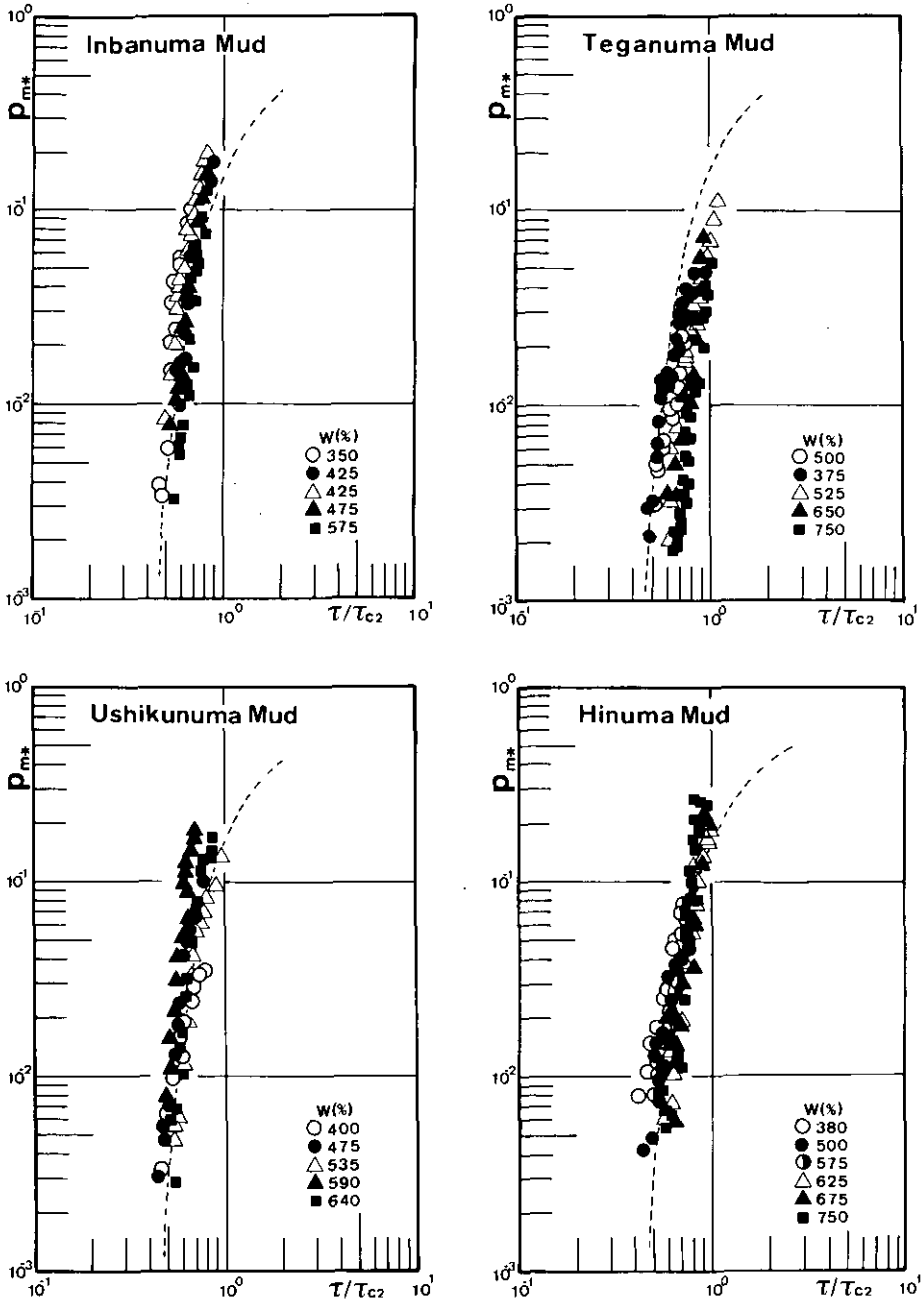


図 9-15 底泥の pick-up rate の推定式の実験的検証  
 Fig. 9-15 Experimental verification of the theoretical curve for non-dimensional pick-up rate  $p_{m*}$



☒ 9-15 (つづき)

Fig. 9-15 (Continued)

検討の余地が残る。それにも関わらず式(9-45)は、底泥の種類のみならず含水比によっても異なる飛び出し量とせん断応力の関係を全て包括しており、このモデルで底泥の初期移動現象を十分記述し得るものと考えられる。

このモデルの適用範囲は、降伏値が存在する底泥であることである。また、 $\tau_{y1}$ が大きすぎても適用できない。 $\tau_{y1}$ が非常に大きくなると、底泥層内部は全く流動しないのにもかかわらず、底泥表層から微細粒子がわずかに巻き上る。これは、界面付近のごく薄い層で濃度勾配が形成されており、濃度が低くて降伏値が小さくなった層内の粒子が飛び出すものと考えられる。この現象は、 $\tau_{y1} > 2 \text{ N/m}^2$ の条件で観察された。このように考えると式(9-45)が適用できる範囲は、第1グループの底泥で  $0.11 \leq \tau_{y1} < 2 \text{ N/m}^2$ の条件のものとなる。自然状態の底泥表層はこの条件を満足している。

### 9.6.5 無次元飛び出し率による流送限界の再評価

8.5.4でも若干ふれたが、 $\tau_{c1}$ は現象論的な定義にもとづく限界値であって、力学的釣り合い条件で決められる静的なものでない。そのため、 $\tau_{c1}$ は飛び出し率との関連で評価すべきものである。 $\tau_{c1}$ は、現象的には底泥の飛び出し量が無視できるせん断応力の上限值と考えられるが、この「無視できる程度の飛び出し量」をいかに客観的に評価するかという問題がある。一つの方法は、 $P_m = \text{const.}$ で評価する方法である。著者の求めた  $\tau_{c1}$ はこの方法によるものであり、おおむね  $P_m = 3 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2\text{s}$ が規準値となっていることがわかった。この方法で求めた  $\tau_{c1}$ と式(8-4)の関係があるが、両者の次元が合わない。もう一つの方法は、 $p_{m*} = \text{const.}$ で評価する方法である。この規準によって求められる  $\tau_{c1}$ は、 $p_{m*} \sim \tau/\tau_{c2}$ に一義的な関係があるので、 $\tau_{c1}/\tau_{c2} = \text{const.}$ なる関係を満たす。今回の実験結果を参照して、 $p_{m*} = 3 \times 10^{-3}$ が適当と思われる。このとき  $\tau_{c1}/\tau_{c2} = 0.5$ となる。この場合、 $\tau_{c1} = 0.5 k_2 \tau_{y1}$ となり、降伏値  $\tau_{y1}$ とも結びつけられることによって、すっきりとした定義となり理論的背景もある。

## 第9.7節 研究成果と問題点

これまでの考察により、底泥の流送特性の基本的性質は、ほぼ明らかにされたと考える。底泥の二つの限界掃流力は降伏値  $\tau_{y1}$ と結びつけられ、飛び出し率は、 $\tau_{y1}$ と粘度  $\eta_1$ の概念を導入することによって式(9-45)のように求められた。また、無次元飛び出し率を用いて新しい流送限界の規準を提案した。このように限界掃流力や飛び出し量に対して、 $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ という流動特性量が支配的因子となることが明らかになったが、 $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ 自体は理論的に求めることは現時点では不可能である。また、厳密に言えば、 $\eta_1$ はひずみ速度制御で得られた特性値であるのに対し、離脱の現象はひずみ速度制御でも応力制御でもない。そのため、底泥のチクソトロピックな性質を考えると、離脱過程には厳密には  $\eta = \eta_1$ とならない可能性がある。しかし、この議論は初期移動機構をいたずらに複雑化するだけで問題の解決に何の益ももたらさないのでこれ以上の言及は避ける。

式(9-45)については、他の研究者の実験データとの比較が望ましいが、残念ながら $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ が不明なので実現できなかった。 $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ を得るためには第5章で述べたような機能をもつ測定装置が必要で、一般的には $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ を求めるのは困難である。しかし、 $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ は間接的な方法である程度推定できる。第4章、第5章で進めた議論によって、 $\eta_1$ と最終沈降体積比 $\varphi_{\infty}$ の間には図4-7なる関係が、 $\eta_1$ と $\tau_{y1}$ には図5-22なる関係がある。よって、 $\tau_{c2}$ 、 $\rho_{m*}$ を推定したい底泥に対して、その底泥の含水比を初期条件として沈降実験を行なって $\varphi_{\infty}$ を求めれば、図4-7、図5-22から $\eta_1$ 、 $\tau_{y1}$ が推定でき、最終的に $\tau_{c2}$ 、 $\rho_{m*}$ も推定可能となる。

飛び出し時の底泥粒子の代表的密度、粒径の決定も今後に残された課題である。これらの量は、次の研究テーマとなる離脱後の粒子の挙動を考察する場合にも重要となる。7.4.6でも述べたように、霞ヶ浦沈降物の離脱後の粒子の平均粒径 $d_o$ が $d_m$ の1~2倍程度であったこと、松尾・嘉門<sup>13)</sup>の研究でもヘドロの自然体積状態のベッドの単位が10~20 $\mu\text{m}$ であり、定方向径の比が1前後という結果を得ていることから、式(9-12)、式(9-15)による $\rho_o$ 、 $d_o$ の評価はあながち不適當ではないと思われる。

第二底泥グループのベントナイトに対しては、 $\tau_{c1}$ が存在しないので今回展開したモデルでは、 $\rho_m$ を評価できない。含水比が低い場合の $\rho_m$ の特性は澤井<sup>9)</sup>の結果と一致しているが、高含水比では低含水比とは違った特性となる。限界掃流力を含めて今後の課題である。

## 第9.8節 結論

第9章では、底泥の飛び出し量に関して、実験的・理論的に論じた。まず初めに、飛び出し量の連続体的な取り扱い方と粒状的な取り扱い方の良否を検討した。その結果、底泥の飛び出し量は、後者の取り扱いが適当であることを示し、次元解析的考察により粘度( $\eta_1$ )が重要な因子となることを示した。その結果に基づき、底泥粒子の離脱過程において粘度に比例する粘性抵抗が作用するとして、粒子の滑動に関する運動方程式を導いた。そして、底泥の粘度が高いため移動粒子は直ちに平衡速度に達すると考えて、底泥粒子の離脱に要する時間を評価した。さらに、流体力の変動を正規分布と仮定し、初期移動に支配的な乱れの周期にもとづく流体力の作用持続時間を考えて、無次元飛び出し率の推定式を導いた。このモデルは、底泥の種類、含水比の影響を包括し、実験結果とも良好に一致した。また、この推定式をもとに新しい流送限界の定義を提案した。それは、無次元飛び出し率の一定値(著者は $\rho_{m*} = 3 \times 10^{-3}$ を提案する)を限界の判定規準とするものであり、この方法によれば、流送限界も値こそ異なるが、降伏値( $\tau_{y1}$ )に比例することになる。この定義は理論的にも明解で客観性もある。

## 参考文献

- 1) 村岡浩爾(1974):流れによる底泥浮上と水質との関連. 第18回水理講演会論文集, 181-186.

- 2) Partheniades, E. (1965) : Erosion and deposition of cohesive soils. Proc.A.S.C.E, **91**, HY1, 105-139.
- 3) 楠田哲也・海田輝之・粟谷陽一・石原達弘 (1982) : 底泥の巻き上げと沈降に関する基礎的研究 (II). 第 18 回衛生工学研究討論会概要集, 152-158.
- 4) 澤井健二 (1977) : 粘着性流路床の変動機構に関する土砂水理学的研究. 京都大学学位論文.
- 5) 細井由彦 (1981) : 底泥浮上モデルに関する一考察. 土木学会第 36 回年次学術講演会概西集第 2 部, 1-2.
- 6) 大坪国順・村岡浩爾 (1982) : 底泥の飛び出し量に関する研究. 第 26 回水理講演会論文集, 141-146.
- 7) 土木学会編 (1971) : 水理公式集など
- 8) 中川博次・辻本哲郎 (1975) : 水流による砂礫の移動機構に関する基礎的研究. 土木学会論文報告集, 第 244 号, 71-80.
- 9) 辻本哲郎 (1978) : 掃流過程の確率モデルとその移動床問題への応用. 京都大学学位論文.
- 10) Einstein, H. A. (1942) : Formula for the transportation of Bed Load. Trans. A.S.C.E., Paper No.2140,561-597.
- 11) 辻本哲郎 (1975) : 砂礫の移動に伴う河床段の発達に関する基礎的研究. 京都大学修士論文.
- 12) Einstein, H. A and E. A. El-Sami (1949) : Hydrodynamic forces on a rough wall, Review of Modern Physics, **21**, 520-524.
- 13) Matsuo, S. and M. Kamon (1977) : Microscopic study on deformation and strength characteristics of claysoil. Proc. 9th. Int. Conf. SM. & F.E, **1**, 201-204.

## 第10章 結 論

以上、本研究において、底泥の限界掃流力と飛び出し量の定式化を目的として、実験的ならびに理論的研究を行った。

底泥の流送特性は、底泥の物理化学的性質、沈降特性および流動特性と密接な関係があると考えられる。そのため、底泥の限界掃流力や飛び出し率を求める実験のほか、底泥の物性、沈降特性および流動特性を求める実験も行い基本的性質を明らかにした。それらの諸特性と限界掃流力や飛び出し率との関係を検討しこの二つの流送に関する基本量を支配する因子を見出しその関係を明らかにした。

本章では、その研究成果を要約し本論文の結論とする。

まず第1章では、序論として本研究の目的および方針を明らかにし、本論文の構成について述べた。

次に第2章では、底泥に関する基礎知識として底泥成分と構造について概説した。初めに底泥成分の概観について述べた。底泥は土壌とほとんど同じ成分構成であるが、土壌と違い気相がなく固相とその間げきを満たす液相の二相から成り立っている。そして主な成分である無機成分、有機成分、交換性塩基の内容や特徴を示した。また、底泥粒子の構造単位の特性やそれらの堆積構造についてふれた。最後に、本研究の研究対象となった底泥を構造単位と含水比によってレオロジーの見地から領域区分した。

第3章では、底泥の物理化学的性質として、各地湖沼や河口で採取した底泥や人為的に有機物を含有させた粘土などに対して、粒度分布、比重、灼熱減量比、コンシステンシー指数を求め、それらの特徴を考察した。底泥はほとんどが細粒土に分類される粒度構成であり、灼熱減量比は現地泥で10~20%程度、比重は2.1~2.7程度であった。灼熱減量比が高いものほど、比重は小さくなる傾向があった。ほとんどの底泥で、その液性限界値と塑性指数の関係がA-line近傍に存在した。液性限界が高い底泥ほど、灼熱減量比が大きく比重が小さい傾向があり、有機物が底泥のせん断強度を高めていることが推察された。人為的に有機物を含有させた場合、その種類によって粘土の性質がかなり異なったものになることがわかった。

第4章では、底泥の沈降特性に関する実験的・理論的研究を行った。同一初期含水比条件でも、底泥の違いにより全く異なった二つの沈降形態が現れた。その原因は、土粒子に吸着する陽イオンの種類にあると推論した。これを確認するために、吸着陽イオンを置換して沈降形態の変化を調べた。底泥は、沈降形態により二つの底泥グループに分類される。第一底泥グループは界面沈降を呈するもの、第二底泥グループは沈面積の出現と微細粒子の高濃度分散系を呈するものである。界面沈降において、最終沈降体積比は初期含水比ではなく粘度 $\eta$ 、によって決まることが

わかった。また、底泥の沈降現象は圧密沈降区間に入る前までは Kynch の理論が成立するが、圧密沈降区間や最終状態では成立しないことがわかった。沈降現象に対して、固液二相流の立場からその支配方程式を誘導し、それをもとに最終状態での底泥の濃度の鉛直方向分布を求めた。そして間げき比を有効応力の指数関数で表現すると、実験値と理論曲線の分布形がよく合うが間隙比と有効応力の関係式は、同一底泥でも初期含水比により異なることが推察された。

第5章では、底泥の流動特性について、主に実験的研究を示した。底泥はチクソトロピックな物質であるので、ずり速度を連続的に変える計測が必要で、流送特性と比較することを考慮すると、ずり速度が非常に小さい領域の流動特性が重要であることを示した。流動曲線にも、沈降形態のグループ分けに呼応して二つの異なった型が現れた。第一底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値の存在と、流動曲線の急激な折れ曲がりである。第二底泥グループの流動曲線の特徴は、降伏値がなく流動曲線にベキ乗則が成立することである。今回の含水比の条件では、5℃～30℃の泥温の変化は底泥の粘度に影響しないことがわかった。また、実験的には、粘度と降伏値は最終沈降体積比で推定できることがわかった。

第6章では、底泥を含めた粘着性土の流送に関する既往の研究を紹介した。アメリカ土木学会の Task Committee の報告が出されるまでの研究は、ほとんどが、液性限界値に近い含水比状態の土の流送抵抗力に関するもので、含水比に対する考察が欠如している。1970年後半の研究は、現象的に興味深いものが多いが、流送特性の基本量である限界掃流力や飛び出し量を定式化した研究はほとんどない。

第7章以下では、本研究の本題である底泥の流送特性に関して実験的、理論的に論じた。

まず第7章では、始めに流送実験の目的や必要性を述べた。次に、限界掃流力と飛び出し量を求める実験に用いた装置、実験方法、手順について述べた。次に底泥の流送形態について論じた。流送形態においても、第一グループと第二グループでは特徴が異なる。第一グループの特徴は、明確な界面の存在と、破壊する少し前に流れと直角方向に亀裂が生ずることである。第二底泥グループの特徴は、不鮮明な界面と、モヤ状の縦縞の発生、さらにいかなる場合も河床に亀裂が生じなかったことである。

第8章では、底泥の限界掃流力に関する実験的・理論的研究について論じた。実験の結果、底泥の流送に関しては、流送限界と破壊限界という二つの限界状態の定義を提案した。限界掃流力も、同一含水比ではなく同一粘度条件でその値が規定される。また、第一底泥グループは、降伏値ともよい対応関係が得られた。理論的考察によって、底泥の初期移動機構としては、滑動離脱が主要であること、流送抵抗力として水中重量によるものは粘着力に比して無視できることがわかった。底泥の限界状態は、静的釣り合い状態として捉えるべきと考え、結局、破壊限界を底泥の限界掃流力と定義した。

第9章では、底泥の飛び出し量に関して実験的、理論的に論じた。飛び出し量の実験結果の整理検討により、底泥の飛び出し量は粒状体的な取り扱いが適当であることが明らかとなった。さらに、粒子の滑動に関する運動方程式と、流体力の変動を考えることによって、底泥の無次元飛



び出し率の推定式を導いた。この推定式は、底泥の種類や含水比の影響を包括し、実験結果とも良好に一致した。この推定式をもとに、新しい流送限界の定義を提案した。この方法によれば流送限界も降伏値に比例することになる。この定義は理論的にも明解で、客観性もある。

以上本研究では、底泥の流送特性として、限界掃流力と飛び出し率の二つの基本量の定式化を目的として、流送特性のみならず、物性、沈降特性および流動特性についても、実験的、理論的に論じてきた。そして、底泥のずり速度の小さな領域の粘度と降伏値が、限界掃流力や飛び出し率の重要な支配因子であることが明らかとなり、これらを用いることによって限界掃流力や飛び出し率を実験的もしくは理論的に求めることに成功した。また粘度と降伏値の計測には、特殊な装置を必要とするが、近似的には最終沈降体積比によって推定できることも示した。

本研究の成果が底泥の流送問題に関してさらに進んだ研究の踏み台となり、底泥の巻き上げによる水質汚濁等の環境問題を解決する上での一助となれば幸いである。

最後に、本研究の目的を深く理解され、研究方針に適切な助言を賜った水質土壌環境部 合田健部長に深甚の謝意を表する次第である。また、本研究の全過程にわたり終始一貫して懇切な御指導をいただいた水質環境計画研究室 村岡浩爾室長に心から感謝の意を表します。また本研究を遂行するにあたり、多くの助言や示唆を賜った京都大学工学部 辻本哲郎助手、土壌環境研究室 高松武次郎主任研究員、向井哲研究員ならびに水質環境計画研究室諸氏に謝意を表する。

実験に協力いただいた小黒良二、高野恒雄氏、当時実習生であった山懸延文、相川博、小野寺俊雄君に感謝します。

さらに、物性測定に協力いただいた 銚環境測定サービス 城取宏氏、図面の作成に協力いただいた十文字力三氏にも厚くお礼を申し上げる。

## 国立公害研究所特別研究成果報告

- 第 1 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究 — 霞ヶ浦を対象域として — 昭和51年度 (1977)  
第 2 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/52年度 研究報告 (1978)

(改 称)

## 国立公害研究所研究報告

- 第 3 号 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)  
(日本産ユスリカ科 *Chironomus* 属 9 種の成虫, サナギ, 幼虫の形態の比較)
- 第 4 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 - 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和52年度中間報告 (1978)
- 第 5 号 芳香族炭化水素 - 窒素酸化物系の光酸化反応機構と光酸化二次生成物の培養細胞に及ぼす影響に関する研究 — 昭和51/52年度 研究報告 (1978)
- 第 6 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(II) — 霞ヶ浦を中心として — 昭和53年度 (1979)
- 第 7 号 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)  
(日本産ユスリカ科20種の成虫, サナギ, 幼虫の形態学的研究)
- 第 8 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和52/53年度 研究報告 (1979)
- 第 9 号 スモッグチャンバーによる炭化水素 - 窒素酸化物系光化学反応の研究 — 昭和53年度 中間報告 (1979)
- 第 10 号 陸上植物による大気汚染環境の評価と改善に関する基礎的研究 — 昭和51/53年度 特別研究報告 (1979)
- 第 11 号 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)  
(大気汚染物質の植物影響およびその植物毒性の機構に関する研究)
- 第 12 号 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)  
(コンピュータ制御装置を利用したフレイムおよび誘導結合プラズマ分光法による多元素同時分析)
- 第 13 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)  
Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.  
Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.  
(多摩川に発生するユスリカの研究  
— 第1報 その一支流に見出されたユスリカ各種の分布と下水による汚染度との関係  
— 第2報 その一支流に見出された Chironominae 亜科の20種について)
- 第 14 号 有機廃棄物, 合成有機化合物, 重金属等の土壌生態系に及ぼす影響と浄化に関する研究 — 昭和53, 54年度 特別研究報告 (1980)
- 第 15 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和54年度 特別研究報告 (1980)
- 第 16 号 計測車レーザーレーダーによる大気汚染遠隔計測 (1980)
- 第 17 号 流体の運動および輸送過程に及ぼす浮力効果 — 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 昭和53/54年度 特別研究報告 (1980)

- 第 18 号 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)  
(環境標準試料「リョウブ」の調製, 分析および保証値)
- 第 19 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅲ) — 霞ヶ浦(西浦)の湖流 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 20 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅳ) — 霞ヶ浦流域の地形, 気象水文特性およびその湖水環境に及ぼす影響 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 21 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅴ) — 霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 22 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅵ) — 霞ヶ浦の生態系の構造と生物現存量 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 23 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅶ) — 湖沼の富栄養化状態指標に関する基礎的研究 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 24 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅷ) — 富栄養化が湖利用に及ぼす影響の定量化に関する研究 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 25 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(Ⅸ) — *Microcystis* (藍藻類) の増殖特性 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 26 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(X) — 藻類培養試験法によるAGPの測定 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 27 号 陸水域の富栄養化に関する総合研究(XI) — 研究総括 — 昭和53~54年度. (1981)
- 第 28 号 複合大気汚染の植物影響に関する研究 — 昭和54/55年度 特別研究報告. (1981)
- 第 29 号 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1981)  
Part 3. Species of the subfamily Orthocladiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.  
Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.  
(多摩川に発生するユスリカ類の研究  
— 第3報 夏期の調査で見出されたエリユスリカ亜科 Orthocladiinae 各種の記載と, その分布の下水汚染度との関係について —  
— 第4報 南浅川の冬期の調査で見出された各種の分布と記載 —)
- 第 30 号 海域における富栄養化と赤潮の発生機構に関する基礎的研究 — 昭和54/55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 31 号 大気汚染物質の単一および複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1981)
- 第 32 号 スモッグチャンバーによる炭化水素-窒素酸化物系光化学反応の研究 — 環境大気中における光化学二次汚染物質生成機構の研究 (フィールド研究1) — 昭和54年度 特別研究報告. (1982)
- 第 33 号 臨海地域の気象特性と大気拡散現象の研究 — 大気運動と大気拡散過程のシュミレーション — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 34 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 35 号 環境面よりみた地域交通体系の評価に関する総合解析研究. (1982)
- 第 36 号 環境試料による汚染の長期モニタリング手法に関する研究 — 昭和55, 56年度 特別研究報告. (1982)
- 第 37 号 環境施策のシステム分析支援技術の開発に関する研究. (1982)
- 第 38 号 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)  
(環境標準試料「池底質」の調製, 分析および保証値)

- 第 39 号 環境汚染の遠隔計測・評価手法の開発に関する研究 — 昭和55年度 特別研究報告. (1982)
- 第 40 号 大気汚染物質の単一及び複合汚染の生体に対する影響に関する実験的研究 — 昭和56年度 特別研究報告. (1983)
- 第 41 号 土壤環境の計測と評価に関する統計学的研究. (1983)
- 第 42 号 底泥の流送特性に関する研究. (1983)

## Report of Special Research Project the National Institute for Environmental Studies

- No. 1\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1976. (1977)
- No. 2\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976–1977. (1978)

[ Starting with Report No. 3, the new title for NIES Reports was changed to: ]

## Research Report from the National Institute for Environmental Studies

- No. 3 A comparative study of adults and immature stages of nine Japanese species of the genus *Chironomus* (Diptera, Chironomidae). (1978)
- No. 4\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1977. (1978)
- No. 5\* Studies on the photooxidation products of the alkylbenzene-nitrogen oxides system, and on their effects on Cultured Cells – Research report in 1976–1977. (1978)
- No. 6\* Man activity and aquatic environment – with special references to Lake Kasumigaura – Progress report in 1977–1978. (1979)
- No. 7 A morphological study of adults and immature stages of 20 Japanese species of the family Chironomidae (Diptera). (1979)
- No. 8\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977–1978. (1979)
- No. 9\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1978. (1979)
- No.10\* Studies on evaluation and amelioration of air pollution by plants – Progress report in 1976–1978. (1979)
- No.11 Studies on the effects of air pollutants on plants and mechanisms of phytotoxicity. (1980)
- No.12 Multielement analysis studies by flame and inductively coupled plasma spectroscopy utilizing computer-controlled instrumentation. (1980)
- No.13 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)
  - Part 1. The distribution of chironomid species in a tributary in relation to the degree of pollution with sewage water.
  - Part 2. Description of 20 species of Chironominae recovered from a tributary.
- No.14\* Studies on the effect of organic wastes on the soil ecosystem – Progress report in 1978–1979. (1980)
- No.15\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1977–1978. (1980)
- No.16\* Remote measurement of air pollution by a mobile laser radar. (1980)
- No.17\* Influence of buoyancy on fluid motions and transport processes – Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Progress report in 1978–1979. (1980)
- No.18 Preparation, analysis and certification of PEPPERBUSH standard reference material. (1980)
- No.19\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Lake current of Kasumigaura (Nishiura) – 1978–1979. (1981)

- No.20\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Geomorphological and hydro-meteorological characteristics of Kasumigaura watershed as related to the lake environment – 1978–1979. (1981)
- No.21\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Variation of pollutant load by influent rivers to Lake Kasumigaura – 1978–1979. (1981)
- No.22\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Structure of ecosystem and standing crops in Lake Kasumigaura – 1978–1979. (1981)
- No.23\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Applicability of trophic state indices for lakes – 1978–1979. (1981)
- No.24\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Quantitative analysis of eutrophication effects on main utilization of lake water resources – 1978–1979. (1981)
- No.25\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Growth characteristics of Blue-Green Algae, *Microcystis* – 1978–1979. (1981)
- No.26\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Determination of argal growth potential by algal assay procedure – 1978–1979. (1981)
- No.27\* Comprehensive studies on the eutrophication of fresh-water areas – Summary of researches – 1978–1979. (1981)
- No.28\* Studies on effects of air pollutant mixtures on plants – Progress report in 1979–1980. (1981)
- No.29 Studies on chironomid midges of the Tama River. (1980)  
 Part 3. Species of the subfamily Orthoclaadiinae recorded at the summer survey and their distribution in relation to the pollution with sewage waters.  
 Part 4. Chironomidae recorded at a winter survey.
- No.30\* Eutrophication and Red Tides in the coastal marine environment – Progress report in 1979–1980. (1982)
- No.31\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1980. (1981)
- No.32\* Smog chamber studies on photochemical reactions of hydrocarbon-nitrogen oxides system – Progress report in 1979 – Research on the photochemical secondary pollutants formation mechanism in the environmental atmosphere (Part 1). (1982)
- No.33\* Meteorological characteristics and atmospheric diffusion phenomena in the coastal region – Simulation of atmospheric motions and diffusion processes – Progress report in 1980. (1982)
- No.34\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1980. (1982)
- No.35\* Comprehensive evaluation of environmental impacts of road and traffic. (1982)
- No.36\* Studies on the method for long term environmental monitoring – Progress report in 1980-1981. (1982)
- No.37\* Study on supporting technology for systems analysis of environmental policy.  
 – The evaluation laboratory of Man-environment Systems. (1982)
- No.38 Preparation, analysis and certification of POND SEDIMENT certified reference material. (1982)
- No.39\* The development and evaluation of remote measurement methods for environmental pollution – Research report in 1981. (1983)
- No.40\* Studies on the biological effects of single and combined exposure of air pollutants – Research report in 1981. (1983)
- No.41\* Statistical studies on methods of measurement and evaluation of chemical condition of soil. (1983)
- No.42\* Studies on the characteristics of mud transportation. (1983)

\* in Japanese