

石炭灰造粒物の海底散布時の 沈降・めり込み特性

CHARACTERISTICS OF FLY ASH BEADS SETTLING AND SINKING INTO THE SEA BOTTOM

井上省吾¹・日高和幸¹・木村道夫¹・日比野忠史²・首藤 啓³

Shogo INOUE, Kazuyuki HIDAKA, Michio KIMURA, Tadashi HIBINO, and Akira SUTOU

¹ 正会員 広島港湾空港技術調査事務所 国土交通省中国地方整備局 (〒730-0029 広島県広島市中区美川町 2-10 愛媛ビル 6F)

² 正会員 博 (工) 広島大学准教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

³ 正会員 (財) 港湾空間高度化環境研究センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-1-10 第2 虎ノ門電気ビルディング 3・4F)

Using a vertical water tank and sea bottom sediment taken from semi-enclosed bay, the settling behavior of fly ash beads which were used for covering sand, the intrusion of fly ash beads to the loose sediment, and the effective thickness after settled were investigated experimentally. Vibration of fly ash beads during settle was appeared, and the decrease of settling velocity was caused by the shape of fly ash beads. Intrusion to the sediment depends on settling velocity, but the intrusion does not occur above on the second layer. The effective thickness can be estimated from the thickness of soft mud layer. Re-suspension due to the intrusion of fly ash beads little affects total turbidity.

Key Words: Fly ash beads, intrusion, sediment, settling velocity, thickness

1. 序論

底質改善は内湾の水環境の再生につながる課題である。一方、循環型社会の形成の観点から、発電副産物である石炭灰の有効利用は天然の海砂の採取が禁止された今日においては CO₂ の排出量の削減とともに、重要な課題である。

既往の研究によって石炭灰造粒物の底質改善への適用性に関しては、以下のような知見が得られている (藤原ら, 2009)。

- 1) 石炭灰造粒物の比重が軽く、粒径が大きいために、約 5 cm の厚さで底泥を被覆することで巻き上がりの抑制効果が期待できる。
- 2) 石炭灰造粒物の持つ化学的特性によって有機泥の分解が促進されることが期待できる。
- 3) 新生堆積物を間隙に取り込むことで覆砂に比べて持続的な効果が期待できる。

上に挙げた特徴は実験室レベルで予想されたものであり、施工条件によっては期待された効果が発揮できるかどうか確認されていない。特に、現地海底での石炭灰造粒物の堆積状況 (被覆状況) を想定して、効果の持続性の検討に必要な施工直後の有効層被覆厚さ (投入量ーめり込み量, 流れの遮断層厚さ

あるいは新生堆積物の取り込み許容体積に相当) を確保できる施工法の検討が必要である。

そこで、本論文では、以下の 3 点に絞って石炭灰造粒物の現地施工に際しての問題点を検討した。

- ① 散布された石炭灰造粒物が沈降中にどのような挙動を示すかを明らかにする。
- ② 石炭灰造粒物が底泥に到達したときに、どのようにして堆積し、材料のめり込みにより堆積物の取り込みが可能 (有効な) 間隙がどの程度形成されるかを明らかにする。
- ③ 石炭灰造粒物が底泥に到達したときに、どの程度の巻き上がりが生じるかを明らかにする。

2. 内湾域における底質含水比の特性

2008 年に 4 回, 2009 年に 2 回, 広島県海田市地先 (海田湾, 干潮時水深約 5 m) の図-1 に示す計 6 か所で底泥の採取を実施した。底泥コアは柱状採泥機を用いて不攪乱採取した。図-2 に含水比の鉛直分布を示している。

含水比の違いは泥の緩さに関係し、石炭灰造粒物を散布した際にめり込み量や巻き上がりの状態の変化につながると考えられる。表層 5 cm において底泥

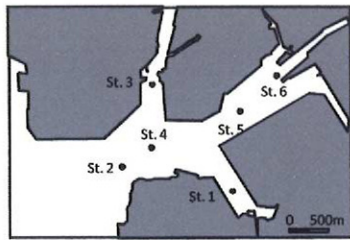


図-1 現地観測地点

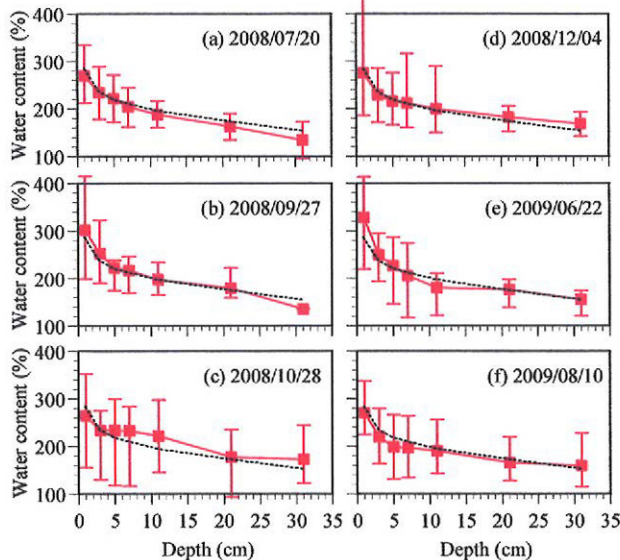


図-2 海田湾における含水比の鉛直分布の季節変化。エラーバーは最大・最小値，点線は平均値を示す。

の含水比は 220～280%に変化し，場所的な違いは最大 100%，最大表層で約 500%を示す地点もある。実験では底泥の含水比の鉛直変化が急で表面の攪乱の影響が小さいと考えられる 20 cm までの層厚さを考慮する。

3. 石炭灰造粒物の沈降特性の確認

まず，水槽を用いた実験を行い，石炭灰造粒物の海域への散布時の沈降状態を確認する。

(1) 石炭灰造粒物の物理特性

実験に用いた石炭灰造粒物は中国電力新小野田火力発電所で産出された石炭灰を粒状に固めたもの（エネルギー・エコマテリア製）である（写真-1）。表-1 にその物理特性を示す。ほぼ球形をしているが，いびつな形状をしているものもある。以降の検討ではこの石炭灰造粒物を使用する。

石炭灰造粒物は軽量で多孔質なため，乾燥状態と湿潤状態で単位体積重量が異なり，水中に浸しておくと約 20 分で飽和状態になる。施工前の処理を省力化し，実際の施工時を想定して，実験では表面乾燥状態にして用いた。なお，乾燥状態の方がめり込み量は小さいことは藤原ら（2009）によって確認されている。この際，砂の散布状態と比較することによ



写真-1 実験に用いた石炭灰造粒物

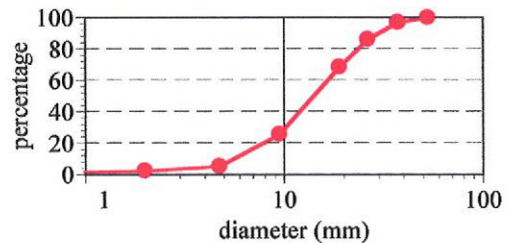


図-3 実験材料の粒度分布

って石炭灰造粒物の散布状態を評価する。

図-3 は実験材料の粒度分布を示している。最大粒径は約 40 mm であり，5 mm 未満の小粒子はふるいにより除かれている。ただし，完全な球形ではないため球形とは異なる沈降特性を示すと考えられる。

(2) 水槽諸元，その他の条件

実験にはアクリル製水槽を用いた。水槽の内寸法は横 350 mm×奥行き 350 mm×高さ 1300 mm である。水槽は塩分濃度が 3.0‰に調整された塩水で満たされている。

(3) 沈降時の挙動

石炭灰造粒物を無作為に 800 個選び，水面から 1 粒ずつ投入し水中を沈降（自由落下）させた。なお，本実験における石炭灰造粒物は歪な形状をしているため，同一体積の球に換算した場合の粒径を換算粒径 D_0 として用いる。この結果，すべての粒径において沈降時には揺動しながら落下した。静水中において球形物体を仮定した沈降中の力のつり合い式は以下の通りである。

図-4 は測定結果と球形を仮定した場合の沈降速度の比較を示している。実験での沈降速度は水面から 50 cm から 100 cm までの通過時間から求めた。図中の実線は球形を仮定した場合の終末速度を示し，点線は終末速度の 60% の速度を示している。ここに，横軸は球を仮定して堆積から換算された粒径である。球形を仮定した場合，換算粒径 60 mm でも散布後の水面下 47.6 cm ですでに終末速度の 90% に達していることが推定される。このことから，アクリル水槽で十分に海底の状態が再現されと考えられる。実測された沈降速度は同一比重で球形を仮定して求められた仮想的な球の沈降速度 u_0 に比べて約 40% 小さくなった。これは石炭灰造粒物の形状に起因すると考えられ，球形に近いが歪な形状のため，同一体

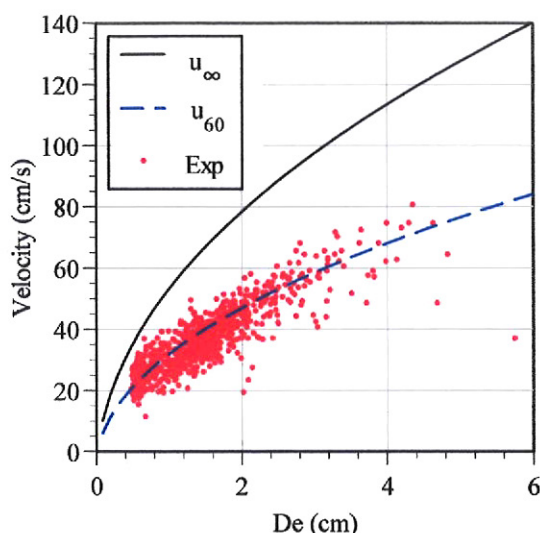


図-4 粒径と沈降速度の関係（石炭灰造粒物（実験値）と球（理論値，同一比重））。 De は球を仮定して体積から換算された粒径。実線は球の終末速度 u_{∞} ，破線は終末速度の60%を示す。

積の球形の物体よりも沈降時に水から受ける抵抗（形状抵抗）が大きいといえる。このことから、被覆層内に間隙を確保するには、適度に歪な形状で流体抵抗が大きい石炭灰造粒物は海底への衝突速度が小さく、めり込み量を小さく抑えることが出来るため適していると考えられる。

(4) 沈降時の挙動

先述の材料が沈降し底面に到達したときの分布（ばらつき）を以下の方法で測定した。すなわち、水面から100 cm沈降させて水槽底面に到達した点のばらつきを測定した。材料の投入は水槽中央から行い、ばらつきは水槽中央からの底面に到達した点までの距離（半径 R ）を測定した（図-5(a)）。石炭灰造粒物の粒径 D_e は5 mm以下（粒子レイノルズ数が2000未満に相当）、6～9 mm、10～19 mm、20～29 mm、および30 mm以上に分け、粒径別に平均値を求めた。図-6は粒径別の半径 R の平均値を示す。どの粒径でも揺れながら沈降するが、その程度は粒子が大きいほど大きくなる。粒径が30 mm以上では沈降途中に水槽壁面に衝突する粒子が増えるため、ばらつき半径は頭打ちとなった。平均的に水槽壁面に衝突しないと考える29 mmまでの粒子のばらつき半径 R を用いて沈降距離100 cmあたりの粒子のばらつき半径を求めると、

$$R = 4.4De + 3.5 \quad (\text{cm}) \quad (1)$$

例えば、直径40 mmの粒子で試算すると、10 m沈降する間に平均的に投入地点を中心に半径約2 mの範囲にばらつくことになる。この結果から、意図的にばらつくように落下させなくても十分に均一に散布できると考えられる。なお、後述する4章の散布実験では壁際に偏らないように注意して散布した。

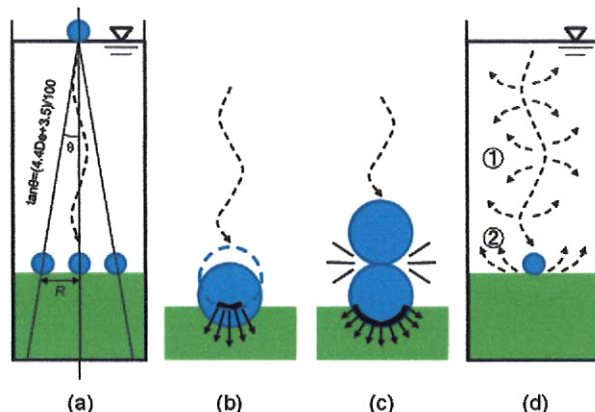


図-5 沈降・堆積時の模式図。(a)ばらつき半径の定義、(b)1層目のめり込み時の底泥からの抵抗、(c)2層目以降のめり込み時の底泥からの抵抗増加、(d)沈降中の懸濁(①)と巻き上がり(②)。

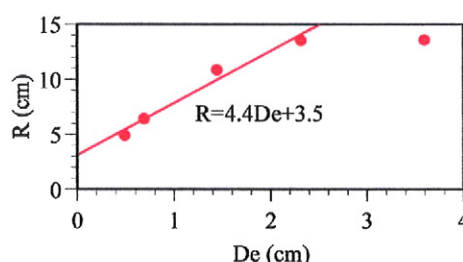


図-6 粒径とばらつき半径の関係（石炭灰造粒物）

4. 石炭灰造粒物の散布に伴う堆積特性と底泥の巻き上がり、懸濁特性

石炭灰造粒物の散布に伴う底泥の巻き上がり、沈降、および石炭灰造粒物の堆積特性を明らかにするため、現地堆積泥を敷き詰めた水槽内で石炭灰造粒物を散布する実験を行う。比較対象として砂を用いる。実験は3.と同じ寸法の水槽を用いて行った。

(1) 石炭灰造粒物と砂の散布量の決定方法

実験に先立って、石炭灰造粒物あるいは砂の散布量を決める必要がある。ここでは、底面が変形しない条件、すなわち有機泥を底面に敷き詰めずに石炭灰造粒物あるいは砂を水中で自由落下させて所定の覆砂厚さ、すなわち、めり込みがない場合の平均厚さ H が約5, 10, および20 cmを確保するのに必要な重量 W を求めた。めり込みなしの平均厚さ H は平面的に一定間隔 ($\Delta x = \Delta y = 11$ cm)の測定点を 3×3 点の格子状に定めて、メジャーを用いて石炭灰造粒物および砂の表面の高さを測定した値から、以下のように平均値を求めた。

$$H = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 (H'(i, j)) \Delta x \Delta y \quad (2)$$

ここに、 $H'(i, j)$ ：各測定点でのめり込みなしの厚さである。すなわち、この H が厚さ換算の散布量となる。表-3はめり込みなしの場合の間隙率 n を求めた結果を示している。

表-1 実験に用いた有機泥

実験での泥表面からの深さ(cm)	採取場所・方法	採取日
0～8	海田湾, エクマン	2009/12/17
8～20	海田湾, エクマン	2008/12/04
20～25	海田湾, 柱状	2008/12/19

表-2 実験条件

Case	材料	厚さ*	散布重量 (g)	散布体積 V_0 (cm ³)
1	FA	5.5 cm	7,521	4,153
2	FA	9.6 cm	13,921	7,901
3	FA	20.7 cm	29,933	16,538
4	N	0 cm	0	0
5	FA	5.5 cm	7,932	4,360
6	N	0 cm	0	0
7	S	4.7 cm	9,500	4,533
8	S	18.8 cm	38,000	18,130

FA: 石炭灰造粒物, S: 砂, N: なし

*: 厚さはめり込みなしの厚さ

表-3 実験結果 (めり込みなし)

Case	みかけの体積 V_1 (cm ³)	間隙体積 $V_1 - V_0$ (cm ³)	間隙率 $(V_1 - V_0)/V_1$ (%)
1	6,738	2,585	38.4
2	11,760	3,859	32.8
3	25,309	8,771	34.7
4	-	-	-
5	6,647	2,288	34.4
6	-	-	-
7	5,758	1,225	21.3
8	23,030	4,900	21.3

$$n = \frac{V}{HA} \quad (3)$$

ここに、 V : 石炭灰造粒物の正味の体積、 A : 水槽底面の面積である。実験には表燥状態 (比重 1.76～1.81) の石炭灰造粒物を用いた。

(2) 実験手順

実験は、有機泥 (性状、量) を敷き均した水槽に、表-2 の実験条件で石炭灰造粒物や砂を散布し、散布前後の表面高さと水質の鉛直分布を測定した。散布は、所定の厚さ分の散布材料を幅 15 cm×長さ 22 cm×深さ 9.5 cm のプラスチックケースに小分けし、水槽の水面上から投入し、水質は多項目水質計 (AAQ1183, JFE アレック製) を用いて測定した。実験後には底泥を 5 cm 毎の層に分けて含水比を測定した。

(3) 実験条件

図-7 は各実験における手順⑨で採取された底泥の含水比の鉛直分布を示す。手順②で約 2 日間静置されており、何も散布しない Case 4 での含水比が現地の堆積状態に近く、表面の含水比は 230% 程度である。表-2 と 3 に各実験での実験条件を示す。底泥面に石炭灰造粒物あるいは砂を約 5～20 cm の 3 つの厚

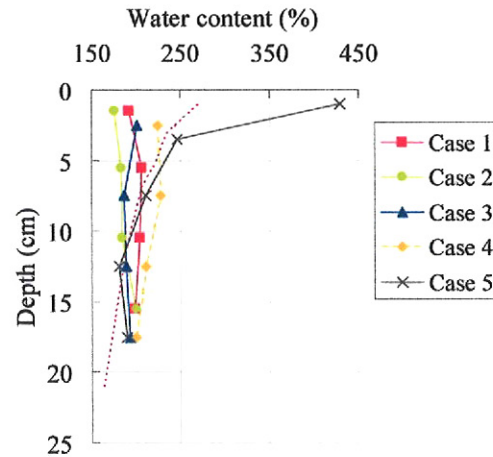


図-7 各実験における含水比 (点線は 2008 年の海田湾現地柱状採泥結果の平均値)

さで散布する場合を計 5 ケース、含水比 400% 程度で堆積している底泥面に石炭灰造粒物を 5 cm の厚さで散布する場合を 1 ケース、何も散布しない場合を 2 ケースの全 8 ケース行った。

(4) めり込み量の定義

散布後の底泥へのめり込み量は、図-8 に示す模式図のように、めり込みがない状態と散布前の泥面を用いて比較することで以下のように定義した。

$$\Delta H = H - H' \quad (4a)$$

$$H' = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 (\eta'(i, j) - \eta_0) \Delta x \Delta y \quad (4b)$$

ここに、 $\eta'(i, j)$: 石炭灰造粒物の表面高さ、 i, j : 測定点番号である。表面の測定位置は実験手順の初期泥面と同じである。 η_0 : 底泥の表面高さであり、側面から直接高さを測定している。

(5) 堆積状態に関する考察

写真-2 は石炭灰造粒物 (Case 1 と 2) と砂 (Case 7 と 8) の堆積状態を示している。石炭灰造粒物を散布した Case 1 と 2 では分級せずに均等に散布されていることが分かる。砂の場合、投入地点を中央に固定させた Case 7 では、水槽端部から泥の吹き出しが生じた。これは、水槽中央の砂の堆積厚さが厚くなった結果、荷重が中央に集中し、砂層厚さの薄い水槽端部で砂層を破って底泥が吹き出たと考えられる。砂を 20 cm 散布した Case 8 では均等に砂が堆積した結果、Case 7 で起こった現象は生じなかった。

(6) 有効厚さに関する考察

図-9 は有効厚さの時間変化を示す。石炭灰造粒物を用いた Case 1 から 3、5 を比べると、初期のめり込みは Case 3、1、2 の順に大きくなり、底泥含水比の大きい Case 5 はほとんどの体積がめり込んだ。Case 1 から 3、5 の底泥表面高さは散布初期には一度盛り上がった後、圧密していくが、いずれの Case も有効厚さは時系列的に変化しない。Case 3 と 8 に

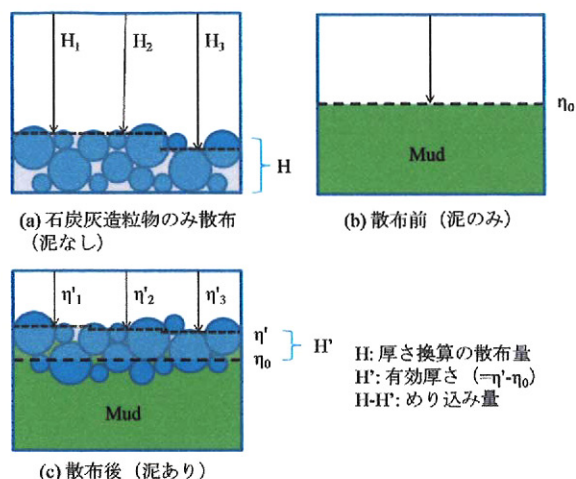


図-8 めり込み量の定義

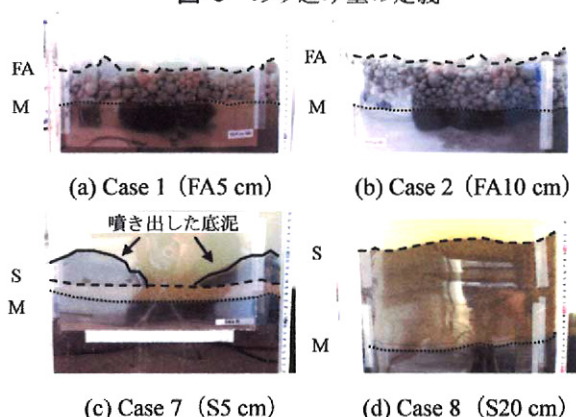


写真-2 堆積状態の比較 (FA: 石炭灰造粒物表面, S: 砂表面, M: 底泥表面)

おいては約1時間のうちに約5 cm ずつ石炭灰造粒物あるいは砂を散布し、その都度、有効厚さを測定している。図-10はCase 3と8における散布量(厚さ換算)と初期有効厚さの関係を示しており、散布量に応じためり込み量の変化は認められず、初期のめり込みで有効厚さが決まっている。このことから、Case 3のめり込み量が大きかった原因は散布量の違いではないと考えられる。なお、砂の場合にめり込み量が小さいのは、個々の粒子の底面への衝突速度が小さくなるためであり、石炭灰造粒物の終末速度は最大で80 cm/sに対して、砂は約10 cm/sである。

図-11(a)は散布量と最終有効厚さ(10日後)の関係を示しており、以下の関係がある。

$$H' = 0.07W - 1.8 \quad (\text{単位: cm}) \quad (5)$$

ここに、 W : 単位面積当たりの散布湿重量(kg/m^2)である。散布量が多くなっても有効厚さの減少率は増えないことから、直接的に泥面に衝突する際のめり込み(図-5(b))が有効厚さの減少に影響し、先に落下した石炭灰造粒物上に落下(図-5(c))してもめり込みは増えないといえる。これは、直接に泥面に衝突する際には応力集中が生じ、泥面にめり込んだ石炭灰造粒物の上に衝突しても応力は分散されるためと考えられる。また、めり込みなしの場合、石炭灰造粒物では間隙率は32~38%、砂では21%であり、石炭灰造粒物は、同じ投入体積でも多くの間隙を得る

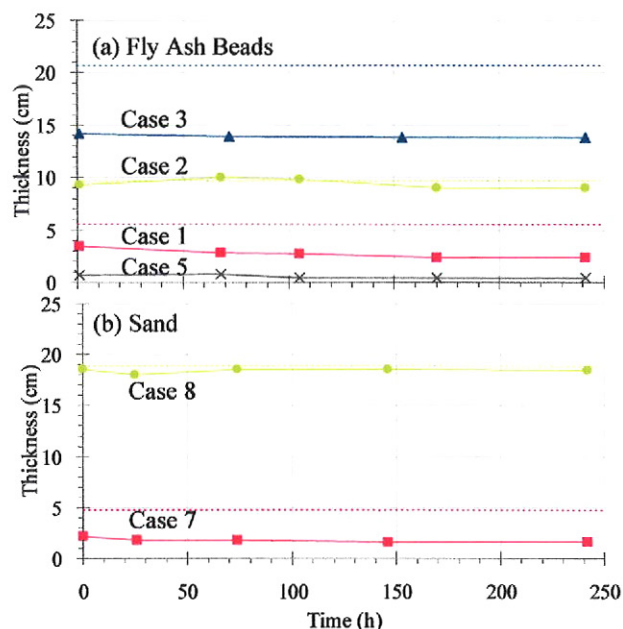


図-9 有効厚さの経時変化(点線はめり込みなし厚さ)

のに有利である。

図-11(b)は厚さ換算された散布量と最終有効厚さの関係を表している。めり込み量は約0.1~5 cmであり、次式のように表層に堆積する緩い底泥の厚さと関係があると考えられる。

$$(H - H')/h = \text{const.} \quad (6)$$

ここでは h を含水比が200%になる底泥深さと定義した。現地で観測される自然堆積状態での h は深さ5 cmの含水比($WC_{5\text{cm}}$)との間に式(7)の関係がみられることから、実験結果にも適用して h を求めた。

$$h = 0.001(WC_{5\text{cm}})^2 - 0.25WC_{5\text{cm}} + 16.3 \quad (7)$$

ここに、単位はcmである。実験結果から定数 $\text{const.} = 0.41$ が求められた。図中の点線は式(6)を用いて含水比の違いによる圧密効果を考慮したものである。以上の結果から、20 cm層厚までの範囲においては、めり込み量は緩い底泥の堆積厚さに依存し、散布量に関わらず一定と考えることができる。

(7) 巻き上がり量に関する考察

図-12は各実験での底面から30 cmの高さでの濁度の経時変化を示している。底泥の性状にも依存するが、概ね72時間で濁度は散布前の状態に戻っている。図-13はCase 1と2での濁度の鉛直分布を示している。鉛直分布は水槽内ではほぼ一様であり、濁度のみでの巻き上がり高さの評価は難しい。図-14は単位面積当たりの散布重量と(a)散布1分後、および(b)散布1時間後における水槽内の単位面積当たりの換算懸濁物量(=濁度×水柱高さ)の関係を示している。Case 5のような底泥の含水比の高い場合には濁度の上昇が大きく、Case 1より大きいことから底泥の巻き上げに由来した濁度上昇があると考えられる。また、散布量が少ないケースでは、底面への衝突速度の違いがあるにもかかわらず砂と石炭灰造

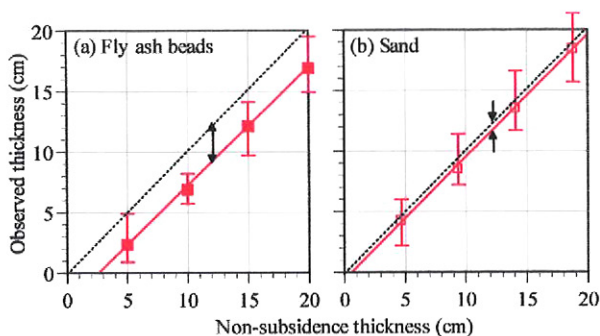


図-10 散布量（厚さ換算）と初期有効厚さの比較（点線がめり込みなしを表す。矢印がめり込み量。エラーバーは最大・最小値。

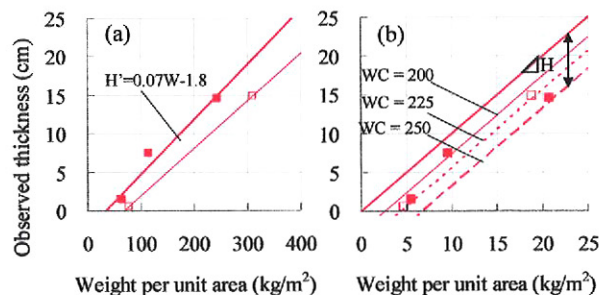


図-11 (a)散布重量と最終有効厚さ、(b)散布量（厚さ換算）と最終有効厚さの比較。点線がめり込みなしを表す。矢印がめり込み量。■：石炭灰造粒物、□：砂

粒物での違いは小さいことから、巻き上がりの影響は小さいことが分かる。一方、厚さ約 20 cm を散布した場合は、砂を散布した Case 8 に比べて石炭灰造粒物を散布した Case 3 の方が 1 分後の濁度が高い。前節に示したように、めり込み量は散布量に依存しない。散布量の巻き上がり量（図-5(d)の②）への影響が少ないと考えれば、この違いは沈降中に剥落（図-5(d)の①）した細粒分の量の違いが原因と考えられる。

5. 結論

(1) 内湾域における底質特性

閉鎖性内湾である海田湾で現地底泥の性状を分析した結果、平均的には表層 2 cm を除けば含水比は 150～280% であり、場所的な違いは最大 100% 程度である。表層 2 cm では最大で約 500% を示す地点も確認され、これらの含水比の範囲でめり込み特性を確かめることが必要である。

(2) 石炭灰造粒物の沈降特性

石炭灰造粒物は球形に近いが歪な形状であり、沈降の際には抵抗が大きいため、海底に達する際の衝突速度は球形に比べて 40% 程度小さくなる。したがって、海底へのめり込み量を小さく抑えるには、歪な形状の石炭灰造粒物は抵抗が大きく有利である。

(3) 石炭灰造粒物の底泥上への堆積特性

めり込み量は緩い底泥の堆積厚に依存するが、底

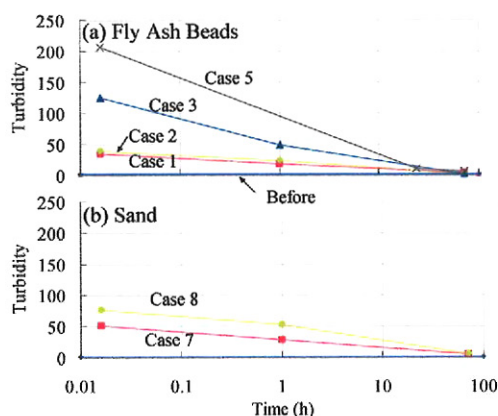


図-12 濁度の経時変化（底面から 30 cm の高さ）

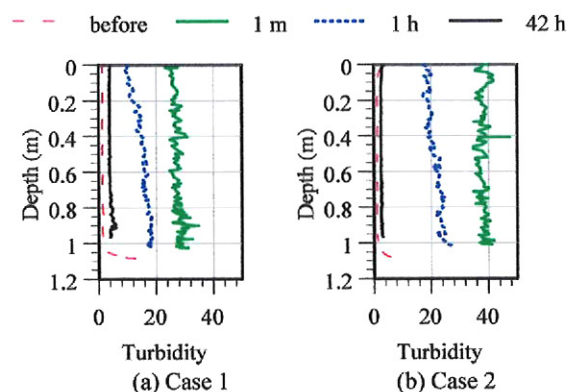


図-13 濁度の鉛直分布（Case 1 と 2）

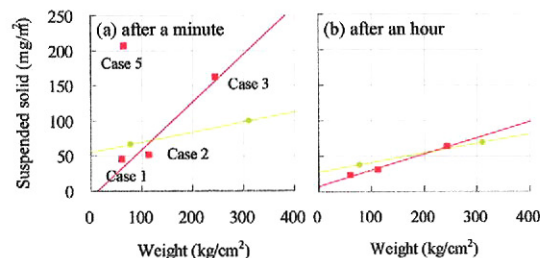


図-14 単位面積当たりの散布量と水中懸濁物量の関係

泥含水比が十分小さい場合（約 200% 以下）、散布厚さ 20 cm の範囲では散布量に関わらず一定と扱ってよく、表層含水比約 230% の場合は 2 cm 程度のめり込みがある。

(4) 石炭灰造粒物の散布に伴う水中の懸濁特性と底泥の巻き上がり

石炭灰造粒物の泥面へのめり込みに伴う底泥の巻き上げは底泥の含水比に依存するが、含水比が十分小さければ巻き上げ量は小さく、むしろ沈降中に剥落する細粒分量に依存する。また、静水中ならば 10 日程度で元の濁度の状態に戻る。

参考文献

- 1) 藤原哲宏, 日比野忠史, 齊藤直, 阿部真己: ヘドロが堆積する内湾での人工覆砂材による底質改善効果, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp. 389-394, 2009
- 2) Rouse, H.: *Elementary Mechanics of Fluids*, Dover Publications, Inc., 1946.
- 3) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂出版, 1969.