

# 底開バージ土砂投入直後に発生する 気泡流動場の観測

THE OBSERVATION OF THE BUBBLY FLOW, WHICH ARISE RIGHT  
AFTER THE HOPPER BARGE EARTH AND SAND INJECTION.

松田信彦<sup>1</sup>・松原雄平<sup>2</sup>・檜谷 治<sup>3</sup>・山本貴司<sup>4</sup>

Nobuhiko MATSUDA, Yuhei MATSUBARA, Osamu HINOKIDANI, Takasi YAMAMOTO

<sup>1</sup>正会員 工修 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1丁目3)

<sup>2</sup>正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

<sup>3</sup>正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

<sup>4</sup>非会員 鳥取大大学院 工学部土木工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101)

Recently, a large workboat is often used from the viewpoint of the economy in the case of the large-scale construction such as the offshore airport and offshore man-made island. It is afraid of the influence of turbidity water to the environment by this construction to throw a large quantity of earth and sand and a rubble stone by using the large hopper barge.

Therefore, in order to reproduce the behavior of turbidity due to the earth and sand injection, several numerical models have been developed. However, because the occurrence mechanism of turbidity at the time of the earth and sand injection is complex, it can't be said that it is fully being cleared as for the property of turbidity water that occurs specially around the surface of the water.

So, local observation is enforced by this research for the purpose of examining the occurrence mechanism of the turbidity around the surface of the water. And, it is examined about the influence of the bubbly flow in the earth and sand injection that exerts it on the turbidity around the surface of the water by using the observation result.

**Key Words :** rubble stone, hopper barge, turbidity, bubbly flow

## 1. はじめに

近年、海上空港や沖合人工島などの大規模な開発に伴い、底開バージなどの作業船も大型化が進んでいる。大型の作業船を使用することで、短期間で効率よく施工する傾向にある。そのため、埋立工事や海岸構造物の基礎工事では、底開バージを使用して大量の土砂や捨石を、一気に投入する工法が主流である。

作業船の大型化は、経済性に優れている一方、環境への悪影響が懸念されることから、最近では、土砂投入をモデルにした濁りの研究が多くなされている。特に土砂投入の落下特性と落下に伴う誘起流については、数値解析的研究<sup>1)</sup>やサーマル理論<sup>2)3)</sup>などの研究で、ある程度まで明らかにされている。

しかし、汚濁発生源付近の拡散メカニズムは複雑で、現在の土砂投入モデルでも、未だ明らかになっていない現象が多く、汚濁発生源の濁り低減対策な

ど、濁りの拡散防止対策が十分に検討できていないのが現状である。

このような解明されていない現象の一つとして、底開バージ土砂投入直後に発生する気泡の影響がある。底開バージで土砂を投入するとすぐに、水面に現れる高濃度の濁り(図-12, 13参照)の発生原因として、気泡流の影響を無視することはできない。

水面付近の濁りは、波や風によって急速に拡散するため、工事周辺の観測点においては、見た目ほど濁度が高くないが、投入土砂に含まれる沈降速度の遅い微細土粒子が、水面付近で長時間浮遊し、大規模な水質汚濁を引き起こしている。港湾工事施工時において通常問題になるのは、下層付近の濁りよりも、目に見える水面付近の濁りであることが多い。

古土井の研究<sup>4)</sup>では、上層の濁りは土砂が海底に達したあとのね返り、下層で広がる乱泥流からの分離、気泡とともに浮上したものが主な原因だと考えられている。

本研究では、底開バージ土砂投入直後に発生する気泡流が、水面付近の濁りの発生メカニズムに大きく影響していると考え、投入直後の気泡流と濁度について現地観測を行い、濁りの発生メカニズムについて検討する。

## 2. 調査方法

### (1) 観測概要

現地観測は、埋立工事が行われていた関西国際空港二期工事で、平成14年5月1・2日の二日間にわたり実施した。観測現場は図-1のように、護岸と汚濁防止膜で囲まれた閉鎖水域で、埋立は底開バージ（約3,000m<sup>3</sup>積）を使用して、山砂を水深約8mに直接投入するもので、一回の投入で1mほど海底面が上昇する。

関西国際空港二期工事では、すべての作業船にGPSが搭載されており、精度の高い土砂の投入管理が行われている。事前に底開バージが土砂投入する正確な位置が、工事で使用されている関空座標系で分かることから、今回の観測にはGPSを搭載した測量船を使用し、観測点の位置決めにはRTK-GPSを使用した。

図-2は観測船の動きを図にしたものである。底開バージが土砂を投入完了し移動したのち、投入開始から5分以内に、投入した場所に観測船を移動し定点観測を行なった。

観測内容は、図-3のように採水、流速の鉛直分布測定の外に、土砂投入前後の深淺測量、投入土砂および海底土砂の粒度分布、採水した試料から濁度と濁水の粒度分布についても調べた。

濁度については、バンドーン式採水器を用いて、投入後5分と20分の計2回、上層、中層、下層の3箇所採取後、積分球式濁度計(TB-51-IS)を使用して測定し、濁水中の土粒子の粒度測定には、濁度で使った同じ試料を用いて、レーザー回折式粒度測定装置(島津SALD-2000A)を使用して計測を行った。

土砂投入前後の深淺測量については、ナローマルチビーム音響測深機を使用した。

今回観測を行った底開バージは2隻で、表-1の通りである。

投入土砂は山砂を使用しており、産地は2隻とも兵庫県淡路島の津名産で、図-4のような粒度分布をしている。山砂の平均粒径は $d_{50}=1.89\text{mm}$ 、 $74\mu\text{m}$ 以下のシルト成分は1.5%。ちなみに、工事の仕様書による山砂のシルト成分含有率は20%未満である。

同様に投入前の海底土砂については、平均粒径は $d_{50}=0.41\text{mm}$ 、 $74\mu\text{m}$ 以下のシルト成分は2.9%であった。

観測日の気象・海象は、表-2に示すとおりである。空港島内は護岸で囲まれており、潮位差によるものと思われる水平流れが、南向きに20~15cm/s程度観

測された。

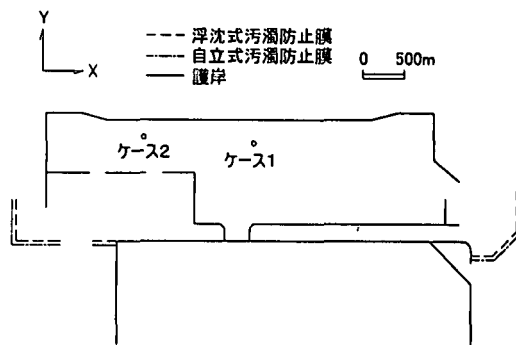


図-1 現地観測位置図

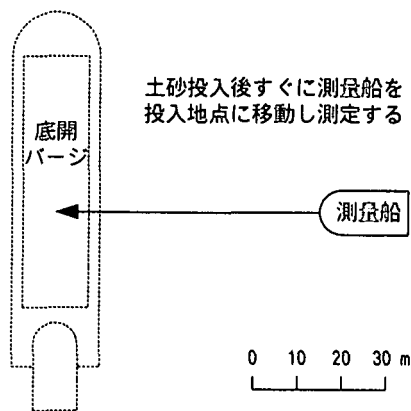


図-2 観測船の動き

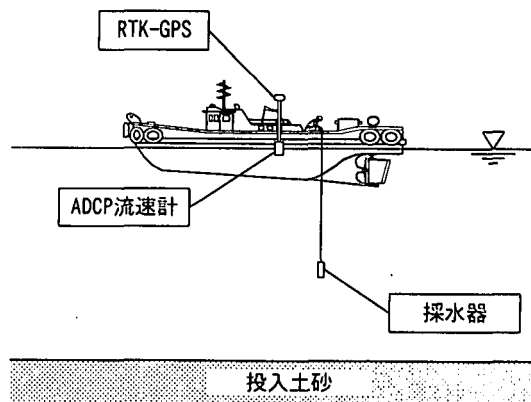


図-3 観測状況

表-1 観測条件

	観測日	船名		搬入量 m <sup>3</sup>	水深m	
		押船	バージ		前	後
ケース1	5/1	ちとせ	NO.2206	1,853	8	7
ケース2	5/2	武庫丸	あ-2号	2,140	8	7

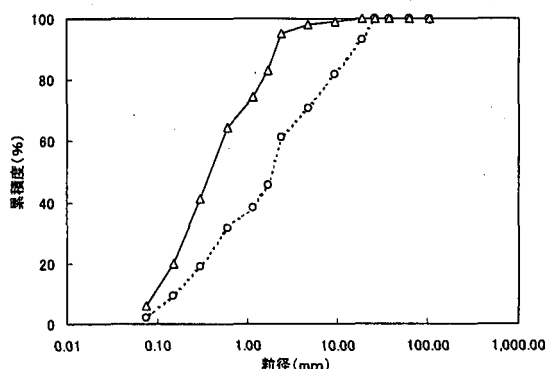


図-4 投入土砂と海底土砂の粒度分布

表-2 観測日の気象・海象

	ケース1	ケース2
観測日	5/1	5/2
投入開始時間	12:30	12:10
風向	67	247
風速	4.4m/s	4.6m/s
潮位	0.7m	0.9m
有義波高	0.39m	0.24m
水温	14.6℃	14.8℃

### (2) 流速測定

流速の測定には、RD Instruments社の音響式ドップラー流速計(ADCP)を使用した。気泡場でADCPを使用すると、気泡により超音波の伝搬が妨げられることが予想されたが、今回の観測は、そのようなデータ欠損はあまり見られなかった。

しかし、ADCPは音響ビームを海中に発射し、海中懸濁物からの反射波のドップラー・シフトから、流向流速のプロファイルを求めることから、今回観測された流速は、水の流速ではなく、気泡と浮遊土砂粒子からの反射波から求められた流速であり、両者を平均したような速度になっていると考えられる。

流速の測定は、水面から水深方向に等間隔(水深0.65m~6.15mまで50cm間隔)で設定した点で三次元流速を測定し、観測は土砂投入開始から20分間連続して行なった。

### 3. 観測結果

#### (1) 土砂投入後の状況

表-3は、ケース2の土砂投入開始からの状況を、時間を追って示したものである。

土砂投入時は、沈降する土砂により発生した下降流によって、水面の水が連行されるため、底開バージ周辺の水面には濁りが無い。

図-5は、土砂投入開始30秒後に水面に現れた気泡の写真である。仮に発生する気泡の直径を1cmとすると、最終上昇速度は約0.6m/sになり、海底から水面まで気泡が到達するには、13秒程度必要である。土砂の投入が完了してから、気泡が水面に現れるまでの時間が15秒であることから、この気泡は土砂が海底面に衝突した後で発生した気泡であると考えられる。気泡量の計測は行っていないが、気泡量が非常に多く水面が気泡で白くなる。

しかし、水面に気泡が現れてもすぐには水面が濁ることはなく、2分30秒ほど経過してから、海面が濁り始める。図-6は投入後約4分後の写真である。勢いよく上昇してくる気泡と共に、濁りが上昇してくるため、水面の濁りが増大する。それまで均一に発生していた気泡は、5分30秒を過ぎた頃から勢いよく気泡が発生している場所と、気泡が発生していない場所に分かれるようになる。この時点で、水面の気泡塊の広がり幅は、勢いよく気泡が発生している所で、直径3m程度で時間が経つにつれて、直径が小さくなり15分後には0.5m程度まで小さくなる。その後、投入開始から20分後には、ほとんど気泡は発生しなくなる。水面の濁りは、20分後には半径200m程度まで拡散している。

気泡単体の大きさは、発生当初からなくなるまで、ほとんど変化しなく、水面で直径2cmほどの小さい気泡である。

目視ではあるが、ケース1で発生した気泡量をケース2と比べると、ケース1は明らかに少なかった。同じ産地の山砂であるが、底開バージの大きさや、山砂の含水比、天候などが発生する気泡量に関係している可能性がある。

表-3 土砂投入後の状況(ケース2)

時間経過	状況
0秒	土砂投入開始
15秒後	土砂投入完了
30秒後	気泡が水面に現れる
1分30秒後	土運船移動
2分30秒後	水面に高濃度濁りが浮上
3分後	観測船観測位置に到着
5分30秒後	気泡の発生量が減少し、発生場所が面から点へ変化 水面の気泡広がり直径3m
15分後	水面の気泡広がり直径0.5m
18分後	わずかに気泡発生

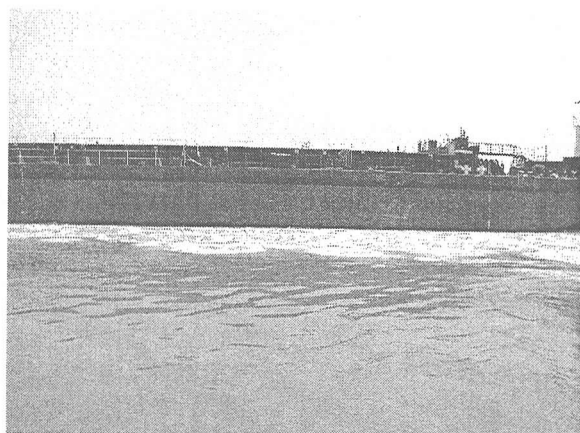


図-5 土砂投入後の気泡

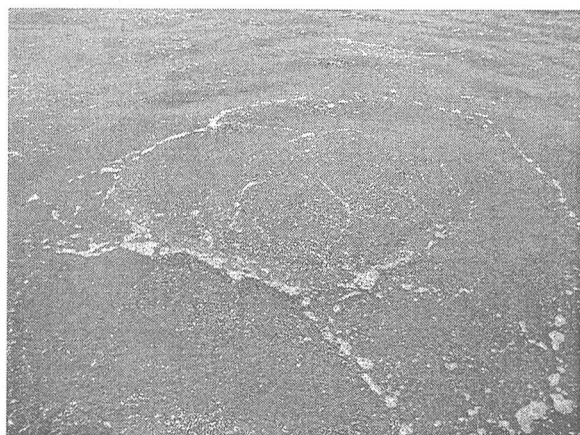


図-6 勢いよく発生する気泡

## (2)海底形状断面

図-7・8は、それぞれケース1とケース2の土砂投入前後の地形図である。実線は底開バージの中心位置で、観測船はこの位置で定点観測を行った。

投入前の地盤高は水深-8mで、投入後には1mほど土砂が堆積し、水深-7mの凸凹のない平らな地形に

変化している。図-7・8で図中のXY座標は、図-1のような関空座標で、単位はmである。土砂を投入した底開バージの土砂投入口の大きさは、長さ約60m、幅が約5mである。

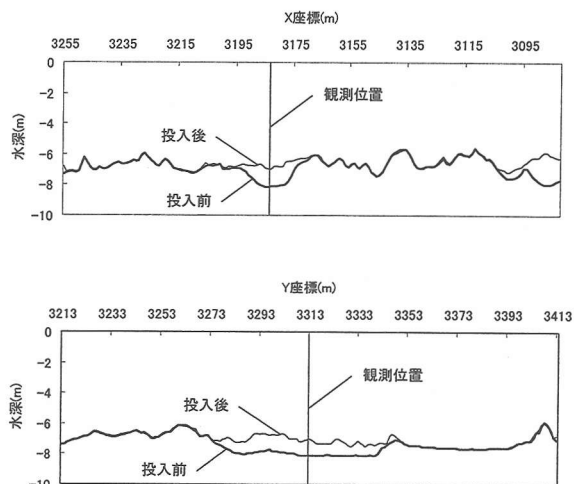


図-7 土砂投入前後の地形 ケース1

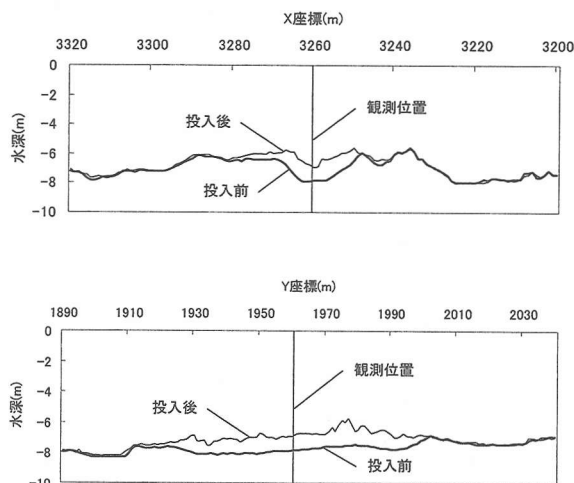


図-8 土砂投入前後の地形 ケース2

## (3)鉛直流速

図-9は2ケースの中でも特に、気泡の発生が多く見られたケース2の上層から下層(図中の上から水深1.15m, 2.15m, 3.15m, 4.15m, 5.15m)までの鉛直流速の時間変化である。観測データは変動が多いため、1分間平均をしている。

土砂投入開始後から5分ほど経過すると、全体的に気泡の発生量が減少し、今まで一様に発生していた気泡に、ばらつきが見られ、気泡が発生している場所と、気泡が発生していない場所が顕著に現れる。

このようなことから、観測船の測定位置によって

は、常時気泡流を観測できておらず、データ変動の原因の一つとして考えられる。

各層の投入開始5分から20分までの鉛直流速を平均すると、2ケースとも上向きで2cm/s程度の上昇流が確認できた。

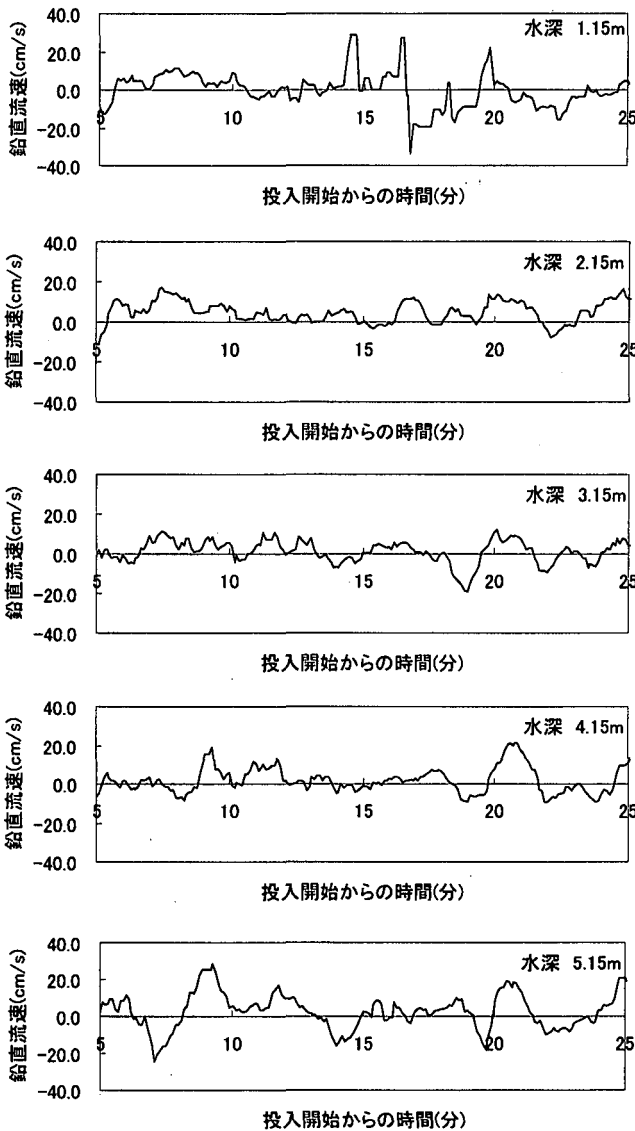


図-9 鉛直流速の時間的変化 (ケース2)

図-10・11は、投入前と土砂投入開始5分後、20分後の鉛直流速分布であり、ケース1とケース2について描いたものである。図-9と同様にデータを1分間平均している。

投入後開始5分後の鉛直流速分布は、ケース1が下層に行くほど上昇速度は大きく、上層では上昇流が十分に発達していない。ケース2については、下層で上昇流が発達した直後で、上層では下降流が残っている。

投入開始後20後の鉛直流速分布は、ケース1では気泡による上昇流が止まり、下降流が発生している。これは、気泡流によって上層まで上昇した、比重の

大きい濁水が、気泡流がおさまった後に再び沈降しているためと考えられる。ケース2については、投入土砂量がケース1よりも多いことから、気泡流による上昇流が、長時間発生している。

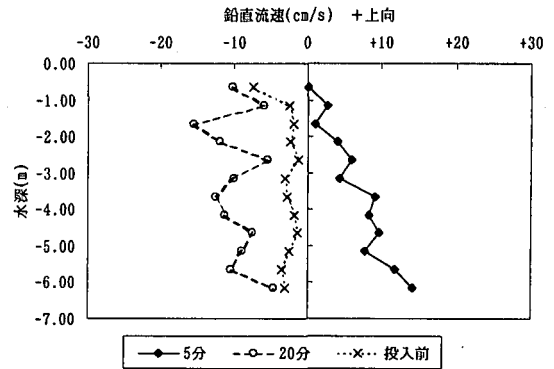


図-10 鉛直流速分布 ケース1

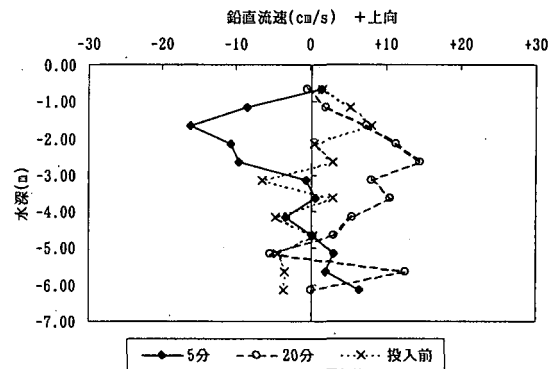


図-11 鉛直流速分布 ケース2

#### (4)土砂投入後の濁度分布

図-12・13は、土砂投入開始5分と20分の鉛直濁度分布の観測結果である。投入前の濁度は、ケース1とケース2とも、SSで5mg/l程度である。

土砂投入開始5分では、どちらのケースも上層に、高濃度の濁りが観測された。土砂投入開始20分には拡散によって、それぞれ濁度が低下している。

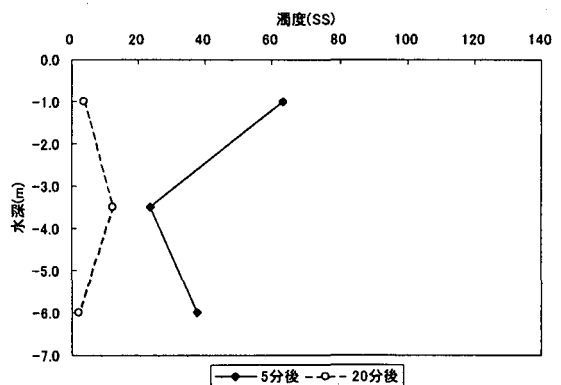


図-12 鉛直濁度分布 ケース1

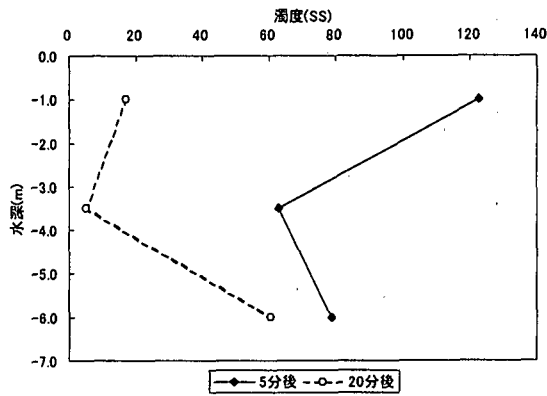


図-13 鉛直濁度分布 ケース2

#### (5)濁水土粒子の粒度分布

図-14はケース2の土砂投入後5分後と20分後に採水した濁水から測定された土粒子の粒度分布を調べたものである。

土砂投入後5分後の上層での平均粒径は $d_{50}=17.24\mu\text{m}$ 、下層では $d_{50}=7.97\mu\text{m}$ と、上層にいくほど大きい粒径になる傾向がみられる。

投入後に濁り粒子の粒度分布が変化することは考えにくいことから、おそらく、濁りの発生源が異なると考えられる。図-4の投入土砂と海底土砂の粒度分布から、底層はシルト成分が多く、細かい粒子が堆積していることから、底層の濁りは、海底土砂の巻き上げによる濁りである可能性が高い。また上層の濁りについては、投入土砂が着底後に気泡とともに流出したものであるとすると、上層の粒度分布が大きくなる事が説明できる。

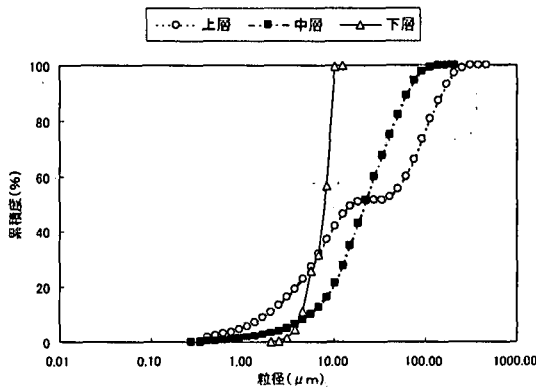


図-14 採水粒度分布 ケース2

#### 4. 水面付近の濁りの発生メカニズム

土砂投入後の状況と観測結果から、土砂投入による下向きの誘起流が発生している時間は数十秒と短く、投入土砂に含まれる気泡が海底に着底後、数分間にわたって大量発生する。その後、その気泡流に乗って濁りが水面付近まで持ち上げられ、高濃度

の濁りが水面付近で長時間浮遊することになる。

水面付近の濁りの発生原因として、分子拡散によるものも考えられるが、仮に濁りが底面から拡散すると仮定すると、底面の濁度が常に高くなければならず、拡散速度も代表速度に比べて非常に小さいことから、水面付近の濁りが分子拡散によるものでないことは明らかである。

#### 5. まとめ

今回の観測では、音響式ドップラー流速計(ADCP)を使用し、土砂投入直後の気泡場を測定した。

その結果、上層、中層、下層において、気泡の上昇と関連して、平均で2cm/s程度の上昇流が発生することが確認できた。

また、上昇流による移流の影響を大きく受けたと考えられる、高濃度の濁りを上層で確認することができた。

土砂投入後5分後の濁水土粒子の粒度分布は、上層にいくほど大きい粒径になる傾向がみられた。

図-15は今回の観測で得られた結果から推測した水面付近の濁りの発生メカニズムである。



図-15 水面付近の濁りの発生メカニズム

謝辞：現地観測を実施するにあたり、東亜建設工業山崎幸輝所長ならびに測量管理作業所の皆様に、ご協力をいただいた。心から感謝の意をあらわす。

#### 参考文献

- 1)重松 孝昌, 個別要素法を用いた個液混相流の解析モデルの開発とその適用性に関する研究, 大阪市立大学学位論文, 1998.
- 2)玉井 昌宏, 分散相誘起型混相流の流動・乱流構造に関する研究, 大阪大学学位論文, 1994.
- 3)秋山 壽一郎, 浦 勝, 静水中に瞬間的に投下された重たい流体塊の流動特性に関する研究, 水工学論文集, 第42巻, pp529-534, 1998.
- 4)古土井 光昭, 港湾工事における濁りの挙動に関する研究, 大阪大学学位論文, 1989.
- 5)松田 信彦, 「港湾工事に伴う濁りの流動特性に関する実験」, 海洋開発論文集, Vol.18, pp.563-568, 2002.