

環境対応型密閉グラブバケットによる 浚渫工事の濁りの発生量調査

FIELD INVESTIGATION ON TURBIDITY CAUSED BY DREDGING
USING SPILL CONTROLLED BUCKET DREDGING SYSTEM

小島幸康¹・永江啓師²・山口知之³・阪口隆史⁴・松田信彦⁵・津田宗男⁵
Yukiyasu KOJIMA, Keishi NAGAE, Tomoyuki YAMAGUCHI, Takashi SAKAGUCHI,
Nobuhiko MATSUDA and Muneo TSUDA

¹(独)水資源機構 琵琶湖開発総合管理所・湖南管理所(〒525-0001 滋賀県草津市下物町1091-58)

²(独)水資源機構 琵琶湖開発総合管理所(〒520-0243 滋賀県大津市堅田2-1-10)

³正会員 修(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

⁴東亜建設工業(株) 大阪支店(〒550-0004 大阪市西区靱本町1-4-12 本町富士ビル)

⁵正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター(〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1-3)

When dredging in rivers, lakes and canals, control on diffusion of suspended sediment contaminated by toxic substances such as dioxin and PCB has become a matter of utmost concern in recent years. Particularly for shallow and narrow waters, development of a new grab dredging system which minimizes turbidity and affect on the ecosystem has been longed for.

In this research, the degree of turbidity and characteristic of suspended sediment diffusion generated by the new Spill Controlled Bucket (SCB) Dredging System and by the conventional method using excavator had been monitored and compared in Lake Biwa. As a result, the degree of turbidity generated by the SCB had reached only 27.1 % of that of the conventional method. Furthermore, numerical simulation of the turbidity showed a good match with the actual measurement and suggested that the forecast of diffusion process would be practical.

Key Words : *turbidity, Spill Controlled Bucket Dredging System, suspended sediment, toxic chemicals, field investigation*

1. はじめに

近年, 港湾や河川, 湖沼におけるダイオキシン類や PCB 等を含む汚染された底質が, 深刻な問題となっている. 汚染物質は水底の表層に分布する土砂の細粒分に吸着しているため, 浚渫工事において濁りが発生すると, 細粒分とともに汚染物質が周辺水域に拡散してしまうこととなる.

濁りの発生, 拡散の防止対策としては, ①汚濁防止膜の展張などの物理的に濁りの拡散を抑制する方法, ②凝集剤などによる微細粒子の凝集作用を利用して沈降促進を図る化学的な方法, ③濁り発生防止のために特別に改良された施工機械を使用する方法, ④施工速度を低下させて濁りの発生を抑制する方法, ⑤沈殿池や濾過槽を設けて細粒分を除去する方法などがある¹⁾.

従来から, 運河や河川, 湖沼などの浅水域や狭隘な水域では, バックホウ台船で浚渫を行い, 発生した多量の濁りは汚濁防止膜によって拡散を防止し, その沈降を待って工事完了としている. このため,

このような水域に適用でき, 濁りの発生を低減できる環境への負荷が小さいグラブ浚渫工法の開発が望まれていた.

濁りの発生量や拡散状況について, 大型グラブ浚渫では多くの調査実績がある²⁾が, 浅水域や狭隘な水域を対象とした小型グラブ浚渫工法の濁りの発生や拡散を調査した事例はほとんどない. このため, 事前に濁りの拡散予測シミュレーションを実施するにあたって, 重要なパラメータである濁りの発生原単位が不明であるため, 精度の高い解析ができない.

本研究では, 新たに開発された環境対応型密閉グラブ浚渫工法(以下, 環境グラブ浚渫工法)と狭隘な運河や河川で実績の多い従来型のバックホウ浚渫工法について, 濁りの発生量(発生原単位)や拡散特性を現地調査によって明らかにした. また, 得られた発生原単位を適用して濁りの拡散の数値シミュレーションを行い, 濁りの拡散特性を検討した. 環境グラブ浚渫工法については, 施工のサイクルタイムと濁りの発生量についても調査を行った.

2. 環境対応型密閉グラブバケット浚渫工法

環境対応型密閉グラブバケット（以下、環境グラブ）は、①高い密閉性能、②掘削時の水抜機構、③薄層浚渫支援システムによる精度の高いバケット姿勢・位置の制御、④水平掘り機構、⑤浚渫土厚に合わせたバケット容量の調節機構などの特徴を有し、浚渫時の濁りの発生を低減できる³⁾。写真-1 に示す環境グラブ浚渫では、高い密閉性により水切りから旋回ステップにおいても濁水がほとんど水面に落下していない。それに対して、写真-2 に示すバックホウ浚渫では多量の濁水が水面に落下している。

グラブ浚渫において、濁りが多量に発生するのは、図-1 に示す浚渫サイクルの着底から掘削、地切りのステップである⁴⁾。環境グラブは刃先面の構造により高い密閉性を有しており、掘削から地切り、水切り、土運船への旋回ステップにおいても、濁水の漏洩による濁りの発生を大幅に低減することができる。密閉性の高さは水掴み試験で定量的に検証されている。水を満杯に掴んだバケットを水面上で10分間保持した場合でも、バケット容量1.3m³に対し、漏水量は100mL(0.008%)であった。

水抜機構は、着底、掘削ステップにおいてバケットの上方から水が抜ける構造である。底泥取込み時に土砂と水の置換えがスムーズに行えるため、余分な水の取込みと濁りを小さく抑えることができる。グラブ上昇時には水抜き穴が閉鎖される構造であるため濁水の漏洩も少ない。

薄層浚渫支援システムは、高精度の刃先面の位置制御によって、着底時の水底の乱れを小さくし、また、水平掘り機能によって余掘り土量を抑え、濁り

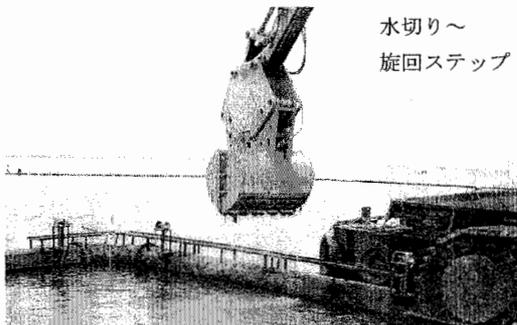


写真-1 環境対応型密閉グラブによる浚渫状況

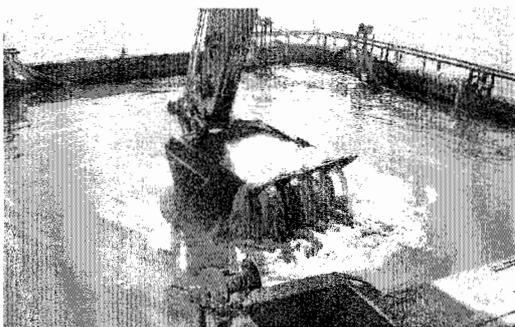


写真-2 バックホウによる浚渫状況

の発生を低減できる。また、バケット容量調整板によってもバケット内の余水量を低減できる。

図-2 は環境グラブ浚渫における濁りの時系列の例である。図中の太線はグラブの上下動を示しており、下端が掘削ステップである。掘削地点と計測地点の離隔のため、グラブの動きと濁りの時間変化にタイムラグがあり、施工ステップと濁りの変化の詳細な対応は不明であるが、グラブの上下動と水底面付近の濁りの時間変化が良く対応している。水面付近は転船による濁りが残っており、大きい値の濁りが出ているが、水切りステップでの濁りの増加は見られず、ほぼ一定の濁度を保っている。

3. 現地調査の概要

(1) 調査区域

琵琶湖南湖西岸の琵琶湖大橋の南約1kmに位置する堅田港の航路維持浚渫工事において、濁りの調査を実施した。新開発の環境グラブ浚渫工法(1.3m³)とこれと同等のグラブ容量のバックホウ浚渫工法(1.4m³)により試験施工を行い、濁りの発生量、拡散特性を調査した。

図-3は、浚渫区域周辺の海底地形と浚渫区域や汚濁防止膜の展張状況を示している。浚渫区域は原水深2～4mの浅い水域に開削された、幅60mの-4m航路

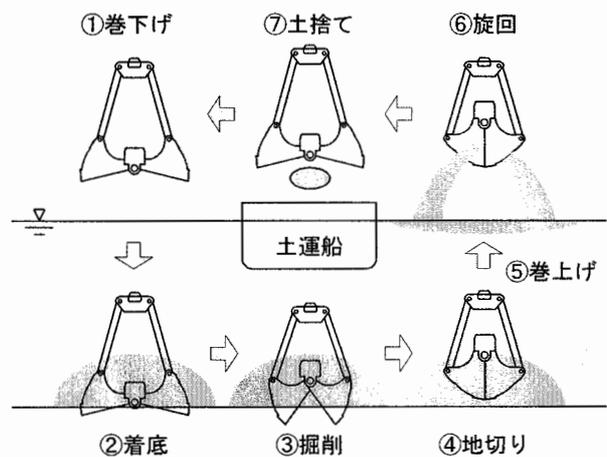


図-1 浚渫サイクルと汚濁発生要因⁴⁾

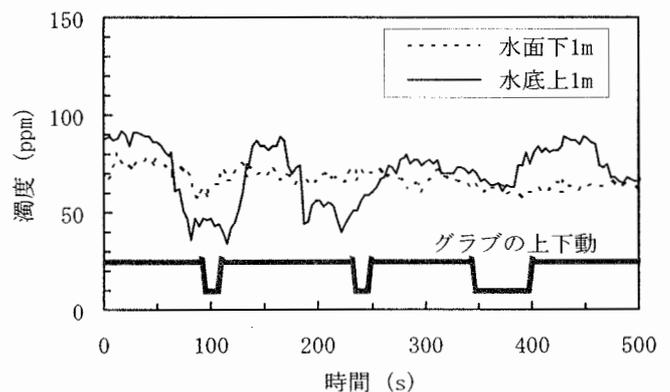


図-2 浚渫サイクルと濁り

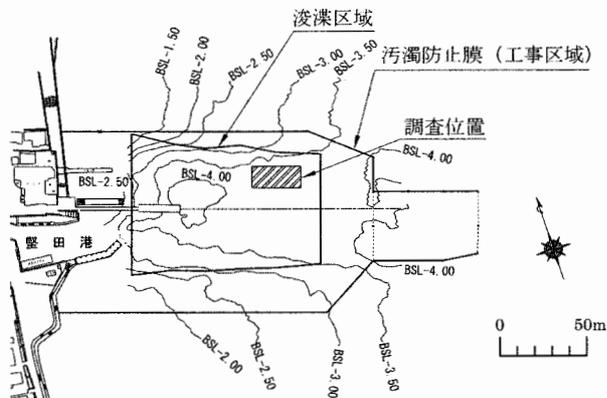


図-3 浚渫区域

である。航路内は浮泥の堆積が進んでおり、浚渫前の平均水深は3.5mであった。このため、浚渫作業によって濁りが発生しやすい条件であった。工事区域の周囲は汚濁防止膜が展張されており、区域内の流速は沖向き2~5cm/sと小さく、ほとんど流れのない状況であった。

(2) 底泥の特性

浚渫区域の底泥の粒径加積曲線を図-4 に示す。事前調査で採取した表層に堆積している底泥は、土粒子の密度 2.45g/cm^3 、シルト・粘土分の含有率 91%、自然含水比が 394%と高く、浮泥であると推測される。一方、浚渫して船揚げされた浚渫土は、土粒子の密度 2.66g/cm^3 、シルト・粘土分の含有率 76%、自然含水比 70%であった。これは浮泥とその下層の砂層を浚渫しているため、細粒分の含有率が相対的に低下しているためと思われる。

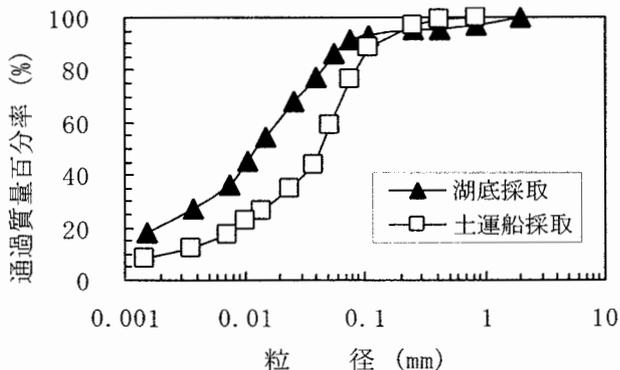


図-4 浚渫土の粒径加積曲線

(3) 調査方法

表-1 は、本調査で実施した調査方法の組合せを示している。サイクルタイムは図-1 で示した浚渫サイクル1回分の所要時間を示している。施工上の制約から、濁りの拡散を抑制するため、原則的に汚濁防止枠のカーテンを垂下させて掘削を行った。ただし、ケース 1, 2 ではカーテンを巻上げ、濁りが自由に拡散できる条件で掘削を行った。

計測パターンは、詳細は後述するが、濁りの発生量(発生原単位)を調査するため浚渫時間内の濁りを連続計測する(A)、サイクルタイムの影響を調査

表-1 調査条件

ケース	バケットの種類	サイクルタイム	汚濁防止枠	計測パターン
1	環境グラブ	110 s	開放	A, C
2	バックホウ	79 s	開放	A, C
3	環境グラブ	130 s	垂下	B
4	環境グラブ	110 s	垂下	B
5	環境グラブ	90 s	垂下	B

するため汚濁防止枠内で濁りの発生量を連続計測する(B)、濁りの拡散状況を調査するため浚渫完了時点での濁りの分布を計測する(C)の3パターンとした。その他、浚渫工事の環境監視として工事区域外周の汚濁防止膜の内外で濁度を計測した。

ケース 1, 2 の比較によって、環境グラブ浚渫とバックホウ浚渫の濁りの発生量と拡散状況の違いを、ケース 3~5 の比較によって、サイクルタイムによる濁りの発生量の変化を検討した。濁りは濁度計で測定し、事前に求めた濁度と浮遊懸濁物質量 SS の相関から SS を算出した。

4. 調査結果

(1) 発生原単位(計測パターンA)

図-5 は計測パターン A の計測機器の配置を示している。これは濁りの発生原単位の調査において、従来から適用されている標準的な方法である²⁾。掘削地点を中心とする同心円上に設置した記録式の濁度計と流速流向計で、掘削作業中に連続観測を行い、計測円を通過する浮遊懸濁物質を捕捉した。なお、水深が小さいため、鉛直方向は水面下 1m と水底面上 1m の上下 2 点で計測しており、中層部の計測は省略した。また、工事区域が狭いことや調査区域の流速が小さいことから、計測円の半径を 23m と小さくした。この調査においては汚濁防止枠のカーテンを巻上げ、濁りが自由に拡散できる状態で計測を行った。

今回の調査で得られた濁りの発生量を、表-2 に示す。環境グラブ浚渫とバックホウ浚渫の浚渫土量はそれぞれ 95m^3 , 103m^3 、所要時間は 2.0 時間、1.5 時

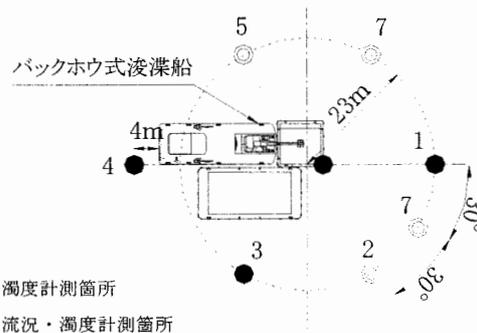


図-5 計測機器の配置(パターンA)

表-2 濁りの発生量

浚渫工法	濁りの発生量	濁りの発生原単位	時間当りの濁り発生量
環境グラブ S	313 kg	3.29 kg/m ³	155 kg/h
バックホウ B	797 kg	7.70 kg/m ³	573 kg/h
比率 S/B	39.3 %	42.7 %	27.1 %

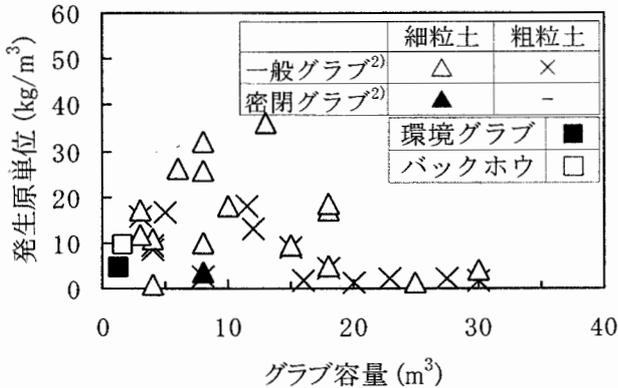


図-6 グラブ容量と濁りの発生量

間であった。

濁りの発生原単位は、浚渫土量当たりの濁りの発生量を示す指標である。環境グラブ浚渫の濁りの発生原単位はバックホウ浚渫のものに比べると39.3%に低減している。また、環境グラブ浚渫の時間当たりの濁り発生量はバックホウ浚渫の27.1%と低減している。この指標は目視で感じる濁りの発生量に近いものである。バックホウ浚渫では施工中に水面が茶色く濁っているのがはっきり視認できたが、環境グラブ浚渫では濁りはほとんど観察されなかった。

図-6 はグラブ浚渫工の濁りの発生原単位の調査結果²⁾を整理したもので、粒径75μm以下の細粒分を50%以上含む浚渫土を細粒土、それ以外のものを粗粒土と分類している。細粒分が多く、グラブ容量が小さい方が濁りの発生量が増大する傾向が見られる。本調査での環境グラブ浚渫は、細粒分が多いにもかかわらず濁りの発生量が小さいことが分かる。

(2) サイクルタイムの影響(計測パターンB)

サイクルタイムを変化させて環境グラブ浚渫による濁りの発生量の調査を行った。図-7は計測パターンBの計測機器の配置である。この調査においては、施工上の制約から汚濁防止柵のカーテンを垂下させた状態で計測を行った。カーテン内側では、鉛直方向には上下2点、カーテン外側では水底面上1mでの1点で計測している。汚濁防止柵内側では柵内に滞留している濁りを、汚濁防止柵外側ではカーテン下部から流出する濁りを連続計測で捕捉している。

環境グラブによる実施工で対応可能なサイクルタイムを考慮して、90、110、130sのサイクルタイムで浚渫を行い、濁り濃度を比較した。特定のステップの所要時間を変化させるのではなく、全ステップの時間を均等に調整してサイクルタイムを変化させ

た。図-8に示すように、サイクルタイムが短くなるとカーテン内側に滞留する濁りも外側へ流出する濁りも大きくなっている。

サイクルタイム130sのケースに対して、別途実施したグラブの掘削ステップのみ35sから20sに短縮したサイクルタイム115sのケースでは、濁りの発生量が1.5倍と大きくなっていた。本調査での全体のサイクルタイム短縮の影響より、掘削ステップの時間短縮による濁りの影響が大きく出ている。グラブの落下エネルギーで刃先を地盤に食込ませるワイヤ式のグラブではグラブの着底速度の影響が大きい⁵⁾が、油圧式的环境グラブは着底速度の制御ができるため、また水抜き機構の効果により、着底ステップの濁りの発生に及ぼす影響が小さいものと思われる。

(3) 濁りの拡散分布(計測パターンC)

図-9は計測パターンCの濁度の計測位置を示している。この調査は、汚濁防止柵のカーテンを巻上げた状態で行った浚渫を対象としている。浚渫完了後に岸向きを除く3方向に、汚濁防止柵から5、10、25、

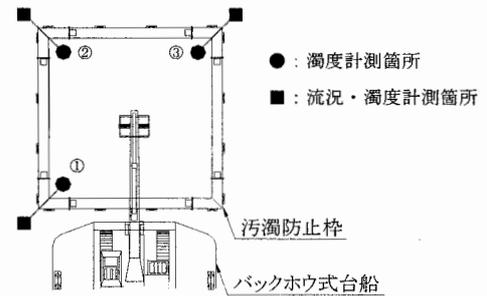


図-7 計測機器の配置(パターンB)

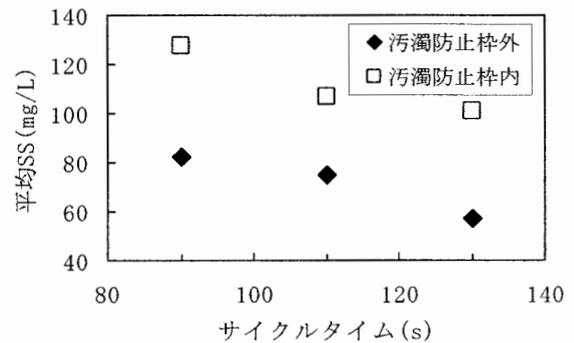


図-8 サイクルタイムとSS

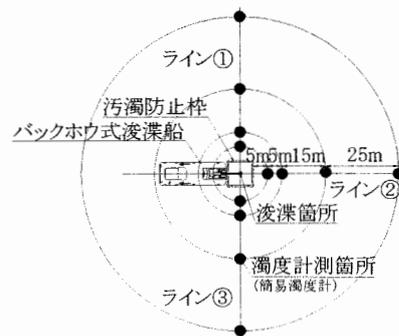


図-9 濁度の計測位置(パターンC)

50m離れた計測点で各上下2点の計測を行い、濁りの拡散分布を調査した。

図-10は3方向の濁りの実測値を示している。図中の線は浚渫船の前方向に対する後述の岩井の理論解である。環境グラブ浚渫による濁りの計測値はバックホウ浚渫による濁りと比較して、離隔距離や上下層にかかわらず、1/2~1/4と小さい。バックホウ浚渫は、浚渫地点近傍で水面付近において多量の濁りが発生しているが、環境グラブ浚渫では濁りが小さい。両者とも沈降速度に比較して流速が小さいため、25m離隔すると濁りは5m離隔点での濁りの1/5程度に減少し、50m離隔すると拡散効果と併せて濁りはほとんど消散している。バックホウ浚渫では沈降速度の大きい粗粒分も巻き上げるため、離隔するにつれて濁度が大きく減少するものと考えられる。

琵琶湖南湖における浚渫工事での濁度の参考管理値はSS換算で20mg/Lとされている。実測値より汚濁防止柵の濁りの遮蔽率を65%とすれば、環境グラブ浚渫では汚濁防止柵を設置すれば離隔5m地点で許容値を満足する。一方、バックホウ浚渫では25m程度の離隔が必要となることが分かる。

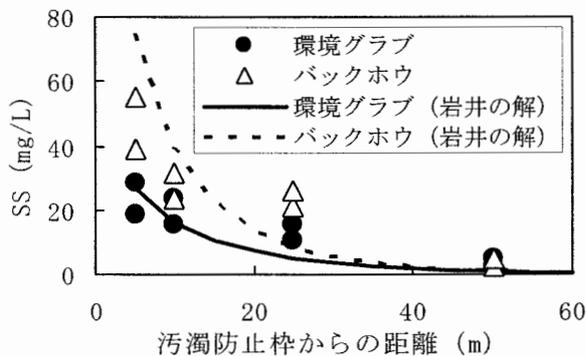


図-10 濁度の分布

(4) 汚濁防止工の遮蔽効果

一般的に汚濁の拡散防止対策として、汚濁防止柵や汚濁防止膜などが適用される。既往の文献調査¹⁾によれば、汚濁防止工による濁りの遮蔽率は40~80%である。また、数値シミュレーションにおいては濁りの遮蔽率を50%としている事例が多い。

汚濁防止柵は浚渫船前面に固定した10×10m程度の鋼製フロート柵に汚濁拡散防止カーテンを吊り下げたものである。柵内で掘削を行うことで、水面付近の濁りの拡散を抑制できる。

本工事では、湖底とカーテン下端のクリアランスを、カーテンを引きずらない最低限の50cm程度に留めている。従って、水深に比べてカーテンが短い一般的な海上工事の浚渫工より、遮蔽効果が高いものと見なせる。ここでは、堅田港における調査結果から遮蔽率を65%としている。

汚濁防止膜は工事区域の周囲に設置し、工事区域外への濁りの漏洩を防止するものである。水面から

カーテンを吊下げる垂下式と海底から上方へ立上げる自立式があり、濁りの特性や周囲への影響の度合いなどを考慮して選定される。一般の海域では潮位変動などの影響を受けるため、水面から海底まで完全に濁りの漏洩を遮断するには特別な対策が必要となる。しかし、琵琶湖では施工期間中の水位変動がほとんどないため、水面から湖底まで1枚のカーテンを容易に固定でき、高い遮蔽効果が期待できる。

堅田港や南浜漁港、尾上漁港の環境監視の濁りの計測結果から得られた遮蔽率は、それぞれ89%、85%、95%であった。

次章の計算では、遮蔽率を汚濁防止柵65%、汚濁防止膜90%としている。

5. 理論解と数値シミュレーション

(1) 岩井の理論解

移流拡散方程式を解いた岩井の理論解と調査結果を比較し、簡便な理論値による濁りの拡散予測を試みた。

式(1)に示す岩井の理論解は、流速 u の x 方向への定常流れのもとで点源から連続的に一定の濁り発生量 q が発生するものとして、移流拡散方程式を解いたものである。ここに、 S は任意の位置(x, y)における濁りの濃度、 H は一定水深、 K は拡散係数、 $IK_0[x]$ は0次の第2種変形ベッセル関数である。

$$S = \frac{q \exp\left(\frac{ux}{2K}\right)}{2\pi HK} IK_0\left[\frac{u}{2K} \sqrt{x^2 + y^2}\right] \quad (1)$$

図-11は、環境グラブ浚渫とバックホウ浚渫について、配置パターンAの計測点における濁りの計測値と岩井の理論値を比較したものである。濁りの発生原単位や流速は計測値を適用している。浚渫地点周辺の海底地形が平坦であったこともあり、理論値と計測値はよく一致している。航路維持浚渫のような海底が平坦な水域では、簡易な理論計算によって、濁りの予測ができることが示された。

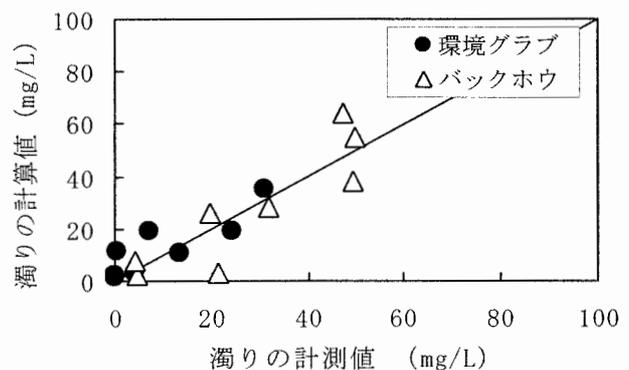


図-11 計測値と計算値の比較

6. 数値シミュレーション

3次元移流拡散方程式の数値シミュレーションを行い、調査結果と比較した。濁りの発生源は、密閉性の高い環境グラブ浚渫では海底面上の点源、グラブの上昇ステップにおいて泥水の漏水が激しいバックホウ浚渫では海底面から水面までの線源としている。図-12は、環境グラブ浚渫とバックホウ浚渫について、配置パターンCの計測点における濁りの計測値と計算値を比較したものである。濁りの拡散状況が数値シミュレーションによって再現できていることが分かる。

本調査の目的の1つに、汚濁防止工の設置費削減の可否の検討がある。従来、工事区域全周に汚濁防止膜を展張し、バックホウ浚渫による濁りの漏洩を防止しており、経済性に問題があった。このため、工事区域外への濁りの漏洩を従来工法と同等以下に維持できる、経済性に優れた浚渫工法の開発が望まれていた。ここでは、汚濁防止膜を展張せず、経済的な汚濁防止枠と濁りの発生量の小さい環境グラブの組合せでの浚渫が提案された。

本工事では施工上の制約から、汚濁防止膜の撤去は認められなかったため、数値シミュレーションにより比較検討を行った。比較を行う濁りの環境監視点は、工事区域の外縁とした。図-13は、提案された環境グラブ浚渫と汚濁防止枠を併用したケースと従来のバックホウ浚渫と汚濁防止膜を併用したケースについて、6時間の浚渫作業後における濁りの分布の計算値を示している。工事区域外では、環境グラブ浚渫はバックホウ浚渫よりも濁りが小さいことが読み取れる。流れの下流側で最も濁りが大きい監視地点の汚濁防止膜外側Pにおいて、バックホウ浚渫ではSSが4.1mg/Lであるのに対して、環境グラブ浚渫では3.7mg/Lである。環境グラブ浚渫工法に汚濁防止枠を併用することで、濁りを従来の施工方法の同等以下に維持することができ、かつ低コストで浚渫できる可能性が示された。

7. まとめ

本研究では、環境対応型密閉グラブ浚渫工法の濁りの発生量や拡散特性について調査を行った。得られた主要な結論は以下の通りである。

①琵琶湖の堅田港において、環境グラブ浚渫工法の濁りの発生原単位を調査した結果、従来のバックホウ浚渫工法の42.7%に低減されていた。時間当たりの濁りの発生量では27.1%に低減されていた。浚渫地点の周囲における濁りの分布も、水面付近、水底面付近ともに環境グラブ浚渫工法が優位であった。②施工サイクルタイムの短縮に伴い、濁りの発生量が増大する。③数値シミュレーションや理論解によって、浚渫工事による濁りの拡散予測が可能である。④汚濁防止枠を併用すれば環境グラブ浚渫工法

によって、汚濁防止膜を展張しなくとも濁りを従来工法と同等以下に維持できる。

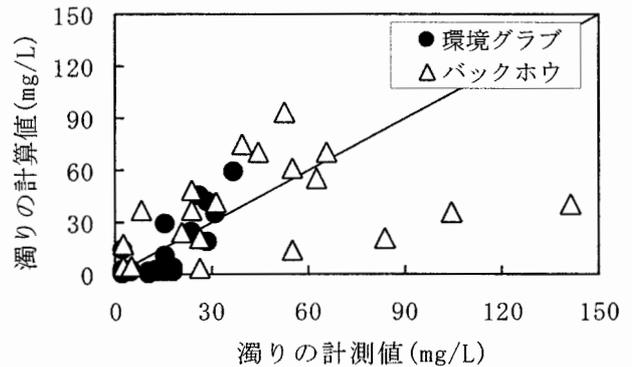


図-12 計測値と計算値の比較

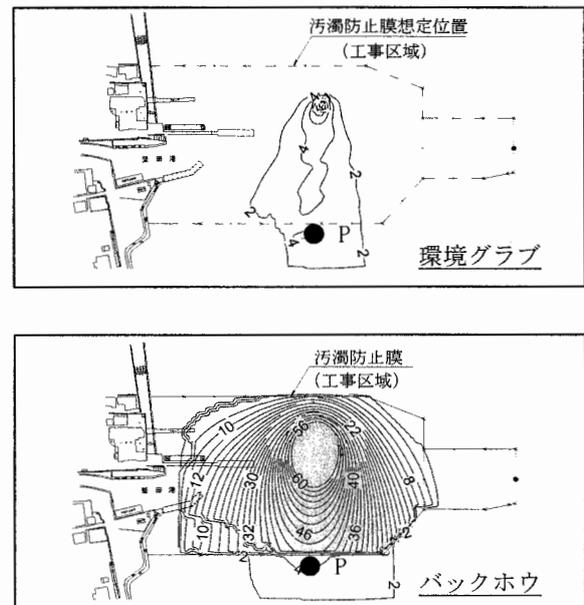


図-13 濁りの分布

参考文献

- 堀江毅：海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について、港研報告，第26巻第2号，pp. 253-295，1987。
- 国土交通省港湾局：港湾工事における濁り影響予測の手引き，54p，2004。
- 津田宗男，和田晴久：スーパーグラブバケット(SGB)浚渫工法—航路・河川・湖沼の環境に配慮した底泥除去工法—，マリンボイス 21，vol. 258，pp. 24-27，2007年11月。
- 松田信彦，五明美智男，松原雄平，檜谷治，黒岩正光：密閉グラブ浚渫で発生する濁りの現地実験，海洋開発論文集，第20巻，pp. 917-922，2004。
- 松田信彦，五明美智男，松原雄平，檜谷治，黒岩正光：グラブ浚渫で発生する流れに関する研究，海洋開発論文集，第21巻，pp. 331-336，2005。