

寄稿論文

転炉系製鋼スラグを用いた浚渫窪地埋め戻し時の 海域環境改善予測

三木 理*¹ 植木知佳*¹ 赤司有三*¹ 中川雅夫*¹ 畑 恭子*² 永尾謙太郎*² 笠原 勉*² 鈴木輝明*³

*1 新日本製鐵株式会社, 〒293-8511 千葉県富津市新富20-1

*2 いであ株式会社, 〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早淵2-2-2

*3 名城大学総合学術研究科, 〒468-8502 愛知県名古屋市中白区塩釜口1-501

2011年5月31日受付, 2011年8月19日採録

Abstract

There are many borrow pits, caused by the sand mining at the bottom of the coastal sea in Japan. Borrow pits have been identified as a source of oxygen-deficient water killing benthic fauna by hydrogen sulfide. And, much nutrients such as nitrogen or phosphorus tend to release from the bottom of borrow pits, which is attributed to red tide. From these reasons, it has become more important to restore borrow pits for marine environment improvement. But, a large amount of earth and sand materials are needed to restore borrow pits. Then, we have examined the restoring borrow pits process by "slag mixture material" mixing the steelmaking slag that is the by-product of the steel industry with the dredged material generated by the sea route maintenance. In this study, firstly, by the experiment using "slag mixture material", we examined the sulfide generation control effect and the microalgae generation control effect by phosphorus release control. Then, by the developed "biogeochemical model" based on the experiment, we predicted the improvement effect when "slag mixture material" are applied to a borrow pit of Osaki area in Mikawa Bay. As a result of that, "slag mixture material" decreased 92% of the reduction material release such as hydrogen sulfide. And, compared with dredged material, "slag mixture material" decreased 26% of the reduction material release. The prediction shows the "slag mixture material" bring larger improvement effects. The restoring borrow pits process by "slag mixture material" mixing the steelmaking slag is more effective for marine environment improvement.

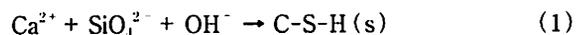
Keywords : steelmaking slag, oxygen-deficient water, hydrogen sulfide, borrow pit, biogeochemical model

1. はじめに

我が国の内湾には、海底土砂を掘削した跡地（以下、浚渫窪地と述べる）が数多く残されており、東京湾を例にとると幕張沖に約10,000 m³もの浚渫窪地が存在している。このような浚渫窪地は、海産生物を死滅させる貧酸素水塊発生の原因となる硫化物を生成し、また、赤潮発生の原因であるリン、窒素などの栄養塩の供給源ともなっている（中村, 2006; 石田ら, 2006; 金子ら, 2011）。これらの理由から、近年、内湾の環境回復のためには浚渫窪地の埋め戻しが必須であるとの認識が高まり、実際に内湾浚渫窪地の埋め戻しが検討されるようになった。例えば、三河湾では航路維持のため発生する浚渫土砂を用いた浚渫窪地の修復事業が実施されており、修復の結果、溶存酸素が回復した事例が報告されている（石田ら, 2006）。

浚渫窪地を埋め戻すためには多量の土砂資材が必要とされることから、浚渫土砂ばかりでなく、製鉄所の副産物である転炉系製鋼スラグを浚渫土砂に混合し、浚渫土砂を改質して浚渫窪地に適用する方法が提案されている（中川ら, 2011）。製鋼スラグは製鋼炉（転炉、電気炉）において、銑鉄やスクラップから鋼を製造する際に発生するスラグの総称であるが、海域利用で適用を検討されている製鋼スラグは転炉系製鋼スラグである。転炉系製鋼スラグはカルシウムシリケート化合物を主体とした無

機物で、安定した生産量と品質を保持できるリサイクル製品であり、道路用路盤材などに広く用いられている。浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを一定量混合することにより、浚渫土砂の強度改善、浚渫土砂の海域適用時の巻き上がり防止、転炉系製鋼スラグ中のCaO起因のpH上昇抑制ばかりでなく、硫化物やリンの溶出抑制効果の向上もはかれる効果が期待できる。なお、強度が上昇するとともに、pH上昇が抑制される機構としては、転炉系製鋼スラグ中のCaOと浚渫土砂中のSiO₂が溶解してカルシウムシリケート水和物CaO-SiO₂-H₂O（以下、C-S-H）を生成するポゾラン反応が進行するためと考えられている（中川ら, 2011; 三木ら, 2009, 2010）。



また、海産生物への安全性についても様々な検証がなされており、例えば、転炉系製鋼スラグを海域に適用した場合を想定した溶出水によるバイオアッセイ試験の結果、pH上昇が抑制されれば影響が生じないことが報告されている（三木ら, 2010）。

本研究では、浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを混合し、改質して浚渫窪地に適用することを想定し、硫化物の発生抑制およびリンの溶出抑制を通じた藻類発生抑制の効果を大型実験水槽などを活用し検証した。さらに、本実験結果を基に、著者らが開発した「浮遊系-底生系結

合生態系モデル」(芳川ら, 2008; 永尾ら, 2008)を用いて, 三河湾実海域の浚渫窪地にスラグ混合土を適用して埋め戻した場合の環境改善効果を予測・評価したので報告する。

2. 転炉系製鋼スラグ活用による環境改善効果の検証

2.1 硫化物, リンの溶出抑制効果の把握

2.1.1 溶出実験方法

溶出実験に用いた東京湾浚渫土砂, 転炉系製鋼スラグ(粒径:0~25 mm), 東京湾浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを50質量%混合した土砂(以下, スラグ混合土と述べる)の性状を Table 1 に示す。含水率, COD, 硫化物は, 底質調査方法(環境庁水質保全局), 湿潤密度は JGS0191, C, N は誘導加熱処理後, 非分散赤外線検出法, P, Fe, Si, Mn, Ca は酸抽出後, ICP 発光分析法でそれぞれ測定した。

Table 1 Characteristics of dredged material of Tokyo Bay, slag added material, and steelmaking slag.

	Dredged material	Slag added material	Steelmaking slag
Bulk density (g·cm ⁻³)	1.34	1.88	3.06
Water content (%)	57.6	31.6	9.46
COD _{5d} (mg·g ⁻¹ -dry material)	12	4.3	2.4
Sulfide(mg·g ⁻¹ -dry material)	0.26	0.26	0.17
T-C (mass%-dry material)	1.77	1.50	0.62
T-N (mass%-wet material)	0.15	0.08	N.D.
T-P (mass%-dry material)	0.05	0.40	0.62
T-Fe (mass%-dry material)	3.67	14.8	28.4
T-Si (mass%-dry material)	23.6	19.0	7.11
T-Mn(mass%-dry material)	0.06	0.51	1.37
T-Ca (mass%-dry material)	1.30	9.88	23.6

東京湾浚渫土砂またはスラグ混合土100 gをガラスびん(容量:1 l)に添加し, その後, 窒素で曝気し溶存酸素(DO)を除去した人工海水(八洲薬品株式会社, 商品名アクアマリン)0.9 lをガラスびんに添加し, 溶出実験サンプルとした。ただし, 東京湾浚渫土砂は, 事前の検討で硫化物の発生量が小さいことが判明したため, 硫化物の発生を促進するため, 易分解性の有機物源として, 浚渫土砂100 gあたりグルコース50 mgをよく練りこみ実験に使用した。

溶出実験サンプルは, 浚渫土砂系, スラグ混合土系でそれぞれ4本ずつ作成し, 密閉, 光遮断, 室温下の条件で60日間放置した。5日後, 10日後, 40日後, 60日後に上澄み液を0.45 μm径のミリポアフィルター付きの注射器でろ過し, 水質分析(pH, 溶存態硫化物, PO₄-P, Ca)を実施した。pHはガラス電極法, 溶存態硫化物は, JISK0102に準拠し, ZnSとして固定化後, 再溶解させ, よう素滴定法で測定した。リン酸態リン(PO₄-P)は, JISK0102に準拠し, モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光度法で5 cmセルを用い測定した。CaはICP発光分析法で測定した。

2.1.2 実験結果と考察

1) 溶存態硫化物

硫酸塩還元反応は(2)式のように, SRB(Sulfide Reduction Bacteria; 硫酸塩還元細菌)が海水中の硫酸塩(SO₄²⁻)を有機物によって還元し, 硫化物を生じさせる反応である。海水中には相当量の硫酸塩(2700 mg·l⁻¹ as SO₄²⁻)が含まれていることから, 浚渫土砂の間隙水中の易分解性有機物量が硫酸塩還元反応の律速要因となりやすいと考えられる。

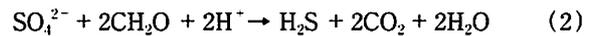


Fig. 1 に浚渫土砂系およびスラグ混合土系の海水中の溶存態硫化物の経日変化を示す。

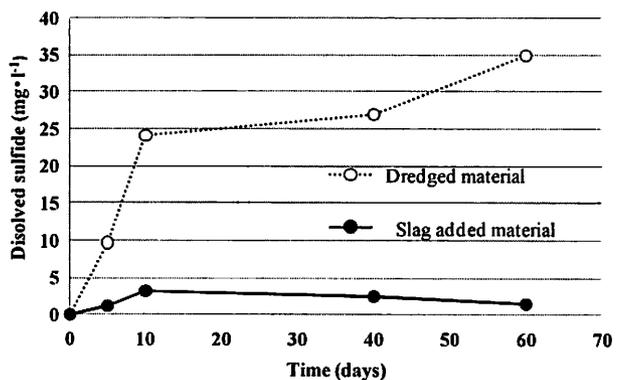


Fig. 1 Time course changes of dissolved sulfide concentration in seawater.

今回, 浚渫土砂には易分解性の有機物としてグルコースを添加していることから, 浚渫土砂系では硫酸塩還元反応が容易に進行し, この結果, 海水中の溶存態硫化物も徐々に増大し, 60日後には35 mg·l⁻¹に達した。一方, スラグ混合土系の海水中の溶存態硫化物は, 実験初期に溶出がやや見られたものの, ほとんど増大せず, 60日間5 mg·l⁻¹以下で推移した。スラグ混合土作成に用いた浚渫土砂にもグルコースは添加されていたものの, スラグ混合土の場合, グルコース添加による硫化物溶出促進効果は小さかった。

これらの結果から, 浚渫土砂にグルコースのような易分解性の有機物がかなり存在していても, 製鋼スラグを50質量%混合して改質した場合, 硫酸塩還元反応の進行が抑制され, この結果, 海水中的での溶存態硫化物の増大が抑制されたと考えられる。このような硫酸塩還元反応の抑制機構としては, 硫酸塩還元反応は浚渫土砂中の間隙水内部でSRBを介して進行するが, 浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを混合することによって浚渫土砂の固化が促進され, 海水中のSO₄²⁻の間隙水への供給が低下し, この結果, SRBの活動も低下したことなどが推察される。このようなスラグ混合土中での硫酸塩還元反応の抑制機構についてはさらに引き続き検討を継続する。

2) リン

浚渫土砂中のリンは, 主として酸化鉄(FeOOH)にリン酸態リン(PO₄-P)が吸着している形で存在してい

る。酸素の無い嫌気条件下では主として、(3)、(4)式のように有機物や硫化物によって、酸化鉄(FeOOH)が還元され、 $\text{PO}_4\text{-P}$ が放出されると考えられている(NERI, 2004)。

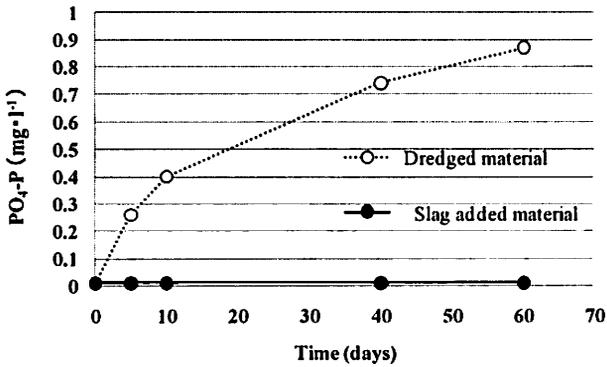
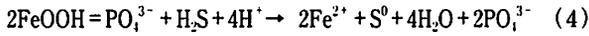
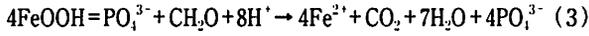


Fig. 2 Time course changes of $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in seawater.

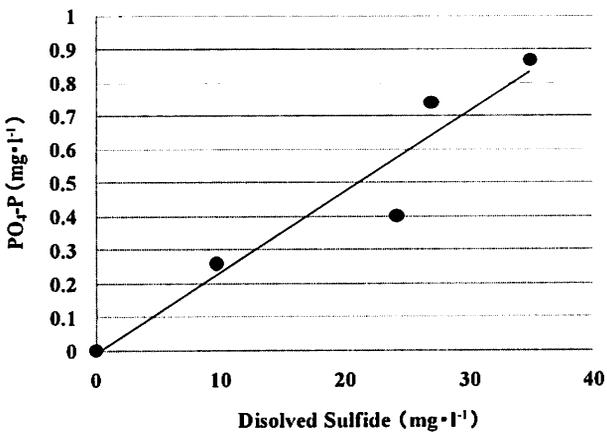
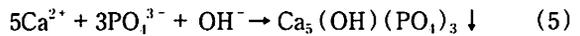


Fig. 3 Relationship between dissolved sulfide and $\text{PO}_4\text{-P}$.

Fig. 2に浚渫土砂系およびスラグ混合土系の海水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ の経日変化を示す。また、Fig. 3に浚渫土砂系の海水での溶存態硫化物と $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出量の関係を示す。

浚渫土砂系の海水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ は、徐々に増大し、60日後には $0.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ に達した。また、Fig. 3に示すように、溶存態硫化物濃度の増大によって $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出量も増大する傾向が見られた。

一方、スラグ混合土系の場合、実験期間中、海水中の $\text{PO}_4\text{-P}$ は検出限界($0.005 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)以下で推移した。スラグ混合土系の海水では、Ca濃度が $400 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ から $1000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後まで、また、pHが8から9前後まで上昇していることから、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は(5)式のようにカルシウムアバタイトして不溶化しやすいことが推定され、この結果、スラグ混合土内に固定化されたものと考えられる。



カルシウムアバタイトは、海域のようにpHが8前後の条件下では極めて溶解度は小さく、pHが極端に低下しない限り、海水への再溶解の可能性も小さいと考えられる(一般水質化学, 1974, 共立出版, 485)。

2.2 藻類増殖抑制効果の把握

2.2.1 実験方法

Fig. 4に浅場水槽実験装置(水槽562.5 l; 循環水槽87.5 l)を示す。実験装置はガラス張りの屋内に設置されている。

東京湾浚渫土砂またはスラグ混合土(転炉系製鋼スラグ50質量%混合土砂)をそれぞれ10 lコンテナ(369 mm × 248 mm × 110 mm)5箱、計50 l(総表面積 = 0.46 m^2)充填し、浅場水槽実験装置2系列に5箱ずつ敷設した。その後、各浅場水槽に人工海水(八洲薬品株式会社、商品名アクアマリン)600 lを添加し、水槽の滞留時間が1時間となるよう循環した。浅場水槽の水深は375 mm、また、コンテナ表面までの水深は150 mmであった。

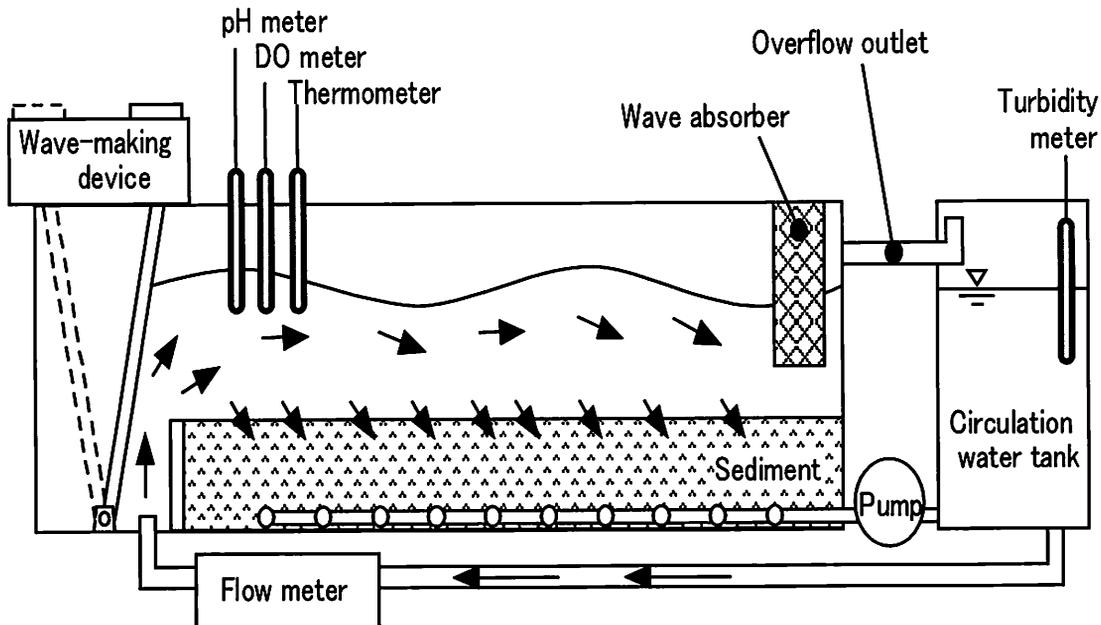


Fig. 4 Experimental apparatus for shallow seabed.

実験は2009年7月23日から9月25日まで約2カ月間実施した。2系列の水槽の水温、pH、DO(溶存酸素)、濁度を連続測定した。実験期間中、海水温は、藻類の発芽に適した25~35℃にほぼ保たれていた。また、水槽表面で波長400~700 nmの光量子束密度をApogee光量子計(株式会社セネコム)で1回/日、午後1時に測定した。光量子束密度は、50~1600($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)で推移し、藻類の育成に必要なレベルにほぼ保たれていた。

実験初期は、毎日、また、2週目以降は、1回/週、各系列の海水を採取し、1 μm 径のろ紙でろ過後、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Si、Caを分析した。窒素はオートアナライザー、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は、JISK0102に準拠し、モリブデン青(アスコルビン酸還元)吸光光度法で5 cmセルを用い測定した。また、Ca、SiはICP発光分析法で測定した。さらに、発生した藻類量については、多波長励起-蛍光光度計(bbe社)を用い、海水中のクロロフィルa総量および以下の4種類の藻類別のクロロフィルa量を測定した。

- ① 藍藻
- ② クリプト植物門
- ③ 緑色植物門(緑藻綱、プラシノ藻綱等)、ユーグレナ植物門
- ④ 黄色植物門(珪藻綱、黄金色藻綱、ラフィド藻綱等)、渦鞭毛植物門

2.2.2 実験結果と考察

1) 海水水質(リン、窒素、シリカ)の比較

浚渫土砂およびスラグ混合土から人工海水中への栄養塩(リン、窒素、シリカ)の溶出は、それぞれ挙動が大きく異なった。

Fig. 5に浚渫土砂系およびスラグ混合土系の人工海水中での $\text{PO}_4\text{-P}$ の経日変化を示す。浚渫土砂系の海水中的の $\text{PO}_4\text{-P}$ は、浚渫土砂からの溶出によって一時0.08 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ まで上昇したが、藻類の増殖に伴い減少し、約1週間で検出限界値(0.005 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)以下となった。さらに、後述するように藻類は増減をくり返したが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ は16日以降検出限界値以下で推移した。一方、スラグ混合土系の海水中的の $\text{PO}_4\text{-P}$ は、実験開始直後から検出限界値以下であり、転炉系製鋼スラグの浚渫土砂への混合・改質によって、浚渫土砂からの $\text{PO}_4\text{-P}$ の溶出がほぼ抑制されたと考えられる。

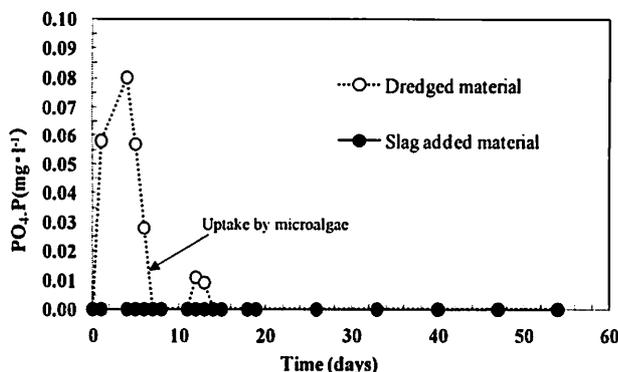


Fig. 5 Time course changes of $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in seawater.

Fig. 6に浚渫土砂単独系およびスラグ混合土系の海水中での溶存態無機窒素($\text{D-IN} = \text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$)の経日変化を示す。浚渫土砂系、スラグ混合土系の海水中的のD-INは、いずれも浚渫土砂からのD-INの溶出によって一時0.8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ まで上昇した。しかし、浚渫土砂系の海水中的のD-INは、藻類の増殖に伴い、 $\text{PO}_4\text{-P}$ と同様に急激に減少し、約1週間で検出限界以下(0.01 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$)となった。一方、スラグ混合土系の海水中的のD-INは、顕著な減少は見られなかった。これはスラグ混合土系の海水は藻類の増殖が小さいため、溶出したD-INの大半がそのまま海水中に存在したと考えられる。リンと比較すると窒素については、転炉系スラグの浚渫土砂への混合・改質による窒素の溶出抑制効果は小さい。

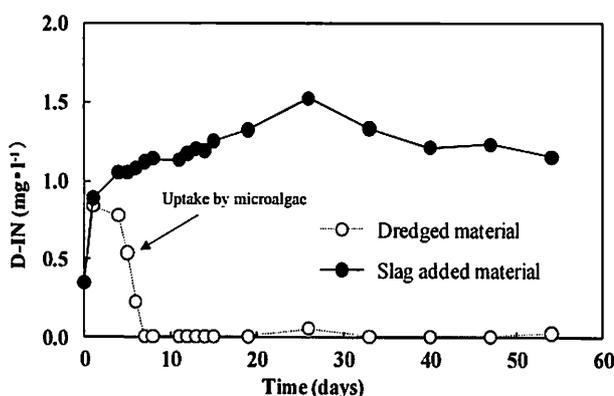


Fig. 6 Time course changes of dissolved inorganic nitrogen concentration in seawater.

Fig. 7に浚渫土砂系およびスラグ混合土系の海水中での溶存態シリカ(D-Si)の経日変化を示す。シリカについても、窒素と同様、転炉系スラグの浚渫土砂への混合・改質による溶出抑制効果は小さく、実験当初、浚渫土砂系、スラグ混合土系の海水中的のD-Siはいずれも急激に上昇した。その後、D-Siはいずれの系も経日的に減少した。D-Siの減少傾向は、藻類の増殖量が多い浚渫土砂系で特に大きく、35日以降ほぼ0となった。浚渫土砂系の場合のD-Siの減少は、主として増殖した藻類による摂取によるものと考えられるが、スラグ混合土系の場合のD-Siの減少は、藻類の増殖が小さいため、他

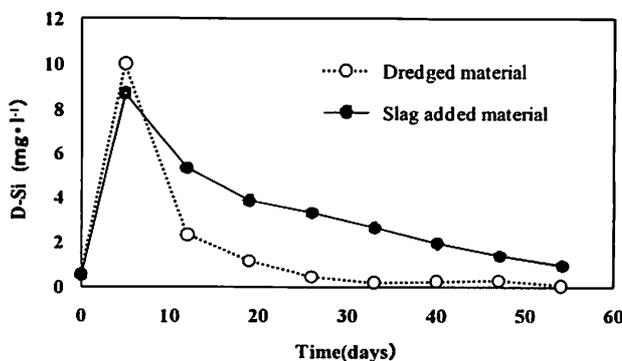


Fig. 7 Time course changes of dissolved silicate concentration in seawater.

の要因による減少も考えられる。例えば、淡水から海洋中に流入するケイ素は、a) 生体中へのとりこみ b) マグネシウムケイ酸塩の沈殿 c) 粘土の合成などの理由によって減少することが知られており(一般水質化学, 1974, 共立出版, 396-397), スラグ混合土系の D-Si の減少は b), c) などの理由によっても減少していると思われる。

2) 発生藻類の比較

浚渫土砂系とスラグ混合土系の人工海水での藻類の発生状況を経日的に比較した結果を Fig. 8, Fig. 9 に示す。

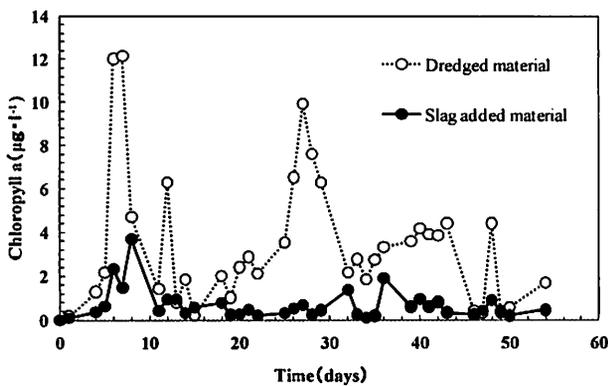


Fig. 8 Time course changes of chlorophyll-a concentration in seawater.

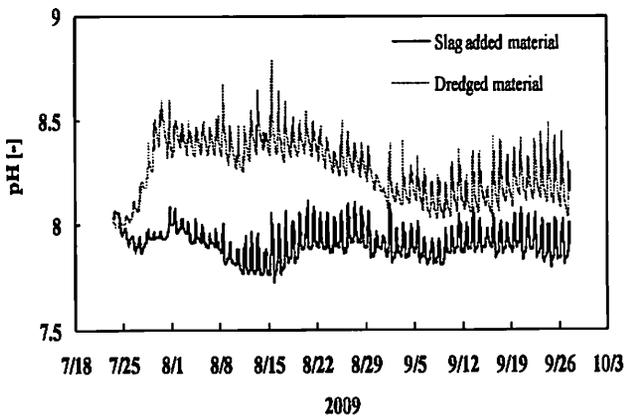


Fig. 9 Time course changes of pH in seawater.

浚渫土砂系の海水では、実験開始1週間後に藻類(クロロフィルa 濃度)が急激に増殖した後、数日で減少に転じた。さらに、このような海水での藻類の増減は実験期間中繰り返し観察された。また、藻類の炭酸同化作用に伴い、浚渫土砂系の pH は 8 から 8.5 前後まで上昇し、昼夜間で大きく変動した。藻類種の変化をみると、初期に増殖する主たる藻類は珪藻を主体とする黄色植物門であったが、リン、シリカが枯渇する実験終期になるにつれ、緑藻を主体とする緑色植物の割合が増大した。

一方、スラグ混合土系の海水では、クロロフィルa は低濃度で変動も小さく推移し、藻類の増殖が浚渫土砂系よりも抑制された。藻類の炭酸同化に伴う pH の上昇も浚渫土砂系よりも小さかった。転炉系製鋼スラグ起因の

pH の上昇は認められなかった。先に述べたようにスラグ混合土系からはリンの溶出がほとんど無いため、海水中のリン濃度が律速となって藻類の増殖が抑制されたと考えられる。藻類種を見ると、浚渫土砂系と比較して、当初から緑色植物の割合がやや高く、実験終期には大半が緑色植物となった。スラグ混合土系からは当初からリンの溶出がほとんど無かったことから、海水中のリン濃度が藻類量ばかりでなく、発生する藻類種にも影響する可能性が考えられる。

3) 考察

以上の水質変化と藻類増殖の実験結果から、以下のことが推定される。

藻類は、海水温が 20℃ 以上に上昇すると海域底質中に潜むシストから発芽し、海水中に栄養塩類(窒素、リン、シリカ)が十分に存在すると急速に増殖するといわれている(赤潮の科学, 1997, 恒星社厚生閣, 74)。今回の実験期間中、海水温は 30℃ 付近に保たれ、光量も十分であった。加えて、浚渫土砂系の場合には、土砂からリンばかりでなく、窒素、シリカがともに溶出した。このため、浚渫土砂系の場合、海域底質中に潜む珪藻を中心とした藻類が海水中に急速に増殖した。一方、スラグ混合土の場合、窒素やシリカは溶出したもののリンの溶出が実験開始直後からほぼ完全に抑制されたため、リンが律速となって海水での藻類の増殖が抑制されたと考えられる。

このように浚渫土砂に転炉系製鋼スラグを混合・改質したスラグ混合土を用いて浚渫地を埋め戻した場合、浚渫地からのリンの溶出はほぼ完全に抑制される。このため、スラグ混合土の浚渫地への適用範囲が広がれば、藻類の過剰な増殖も抑制され、さらに、死滅し浚渫地に沈降、堆積する藻類(新生堆積物)に起因による硫化物の生成抑制にもつながることが期待される。

3. 「浮遊系-底生系結合生態系モデル」による実海域での環境改善予測

3.1 モデルにおける改良効果の表現

製鋼スラグによる浚渫土砂の改良効果として、実験により把握された主な事象を以下にまとめて示す。

底泥からのリン酸態リンの溶出抑制効果を有する
 底泥からのアンモニア態窒素の溶出抑制効果は小さい
 底泥からの硫化水素の発生抑制効果を有する
 底泥内の好気・嫌気分解の進行を抑制させる可能性がある
 底泥の物理的強度を増強させる

スラグ混合土を用いて浚渫地の埋め戻しを行った際、これらの改良効果が海域においても発現されると仮定した上で、「浮遊系-底生系結合生態系モデル」を用いて、スラグ混合土の海域利用による環境改善効果を予測した。

「浮遊系-底生系結合生態系モデル」は、水質及び底質、底生生物間の相互作用を考慮したシミュレーションモデルであり、貧酸素化の予測に必要な不可欠な硫化水素等の酸素消費物質(いわゆる負の溶存酸素)を解析する

ことができる。「浮遊系-底生系結合生態系モデル」の物質循環図を Fig. 10 に示す。

実験により把握されたスラグ混合土による環境改善効果について、「浮遊系-底生系結合生態系モデル」において以下のように条件設定した。

- 底泥からのリン酸態リンの溶出抑制効果を有する
 - 在来泥中の $PO_4\text{-P}$ 量の計算初期値をゼロとする
 - 嫌気状態で底泥から脱着する吸着態の $PO_4\text{-P}$ 量の計算初期値をゼロとする
- 底泥内の好気・嫌気分解の進行を抑制させる可能性がある
 - 在来泥中の有機物(デトリタス)の計算初期値をゼロとする

この条件設定により、在来泥からのリン酸態リンの溶出は抑制されるとともに、間隙水中に含まれるアンモ

ニア態窒素の溶出については抑制しない計算になる。また、在来泥中の有機物量の初期値がゼロであるため、分解の進行は抑制され、底泥の酸素消費も抑制される。一方で、水中から新たに沈降する新生堆積物については何も条件設定を行っていないため、溶出・分解ともに施工区域外と同様のふるまいをする。

3.2 予測条件

「浮遊系-底生系結合生態系モデル」を用いて、スラグ混合土の海域利用による環境改善効果を予測する対象海域として三河湾を選定した。三河湾では、2003年から2008年にかけて湾奥の御津地区と大塚地区の二か所の浚渫地の埋め戻しが行われている(石田・鈴木, 2006, 三河湾事務所, 2008)。ここでは、Fig. 11 に示す三河湾奥部に存在する大崎航路内の浚渫地をケース

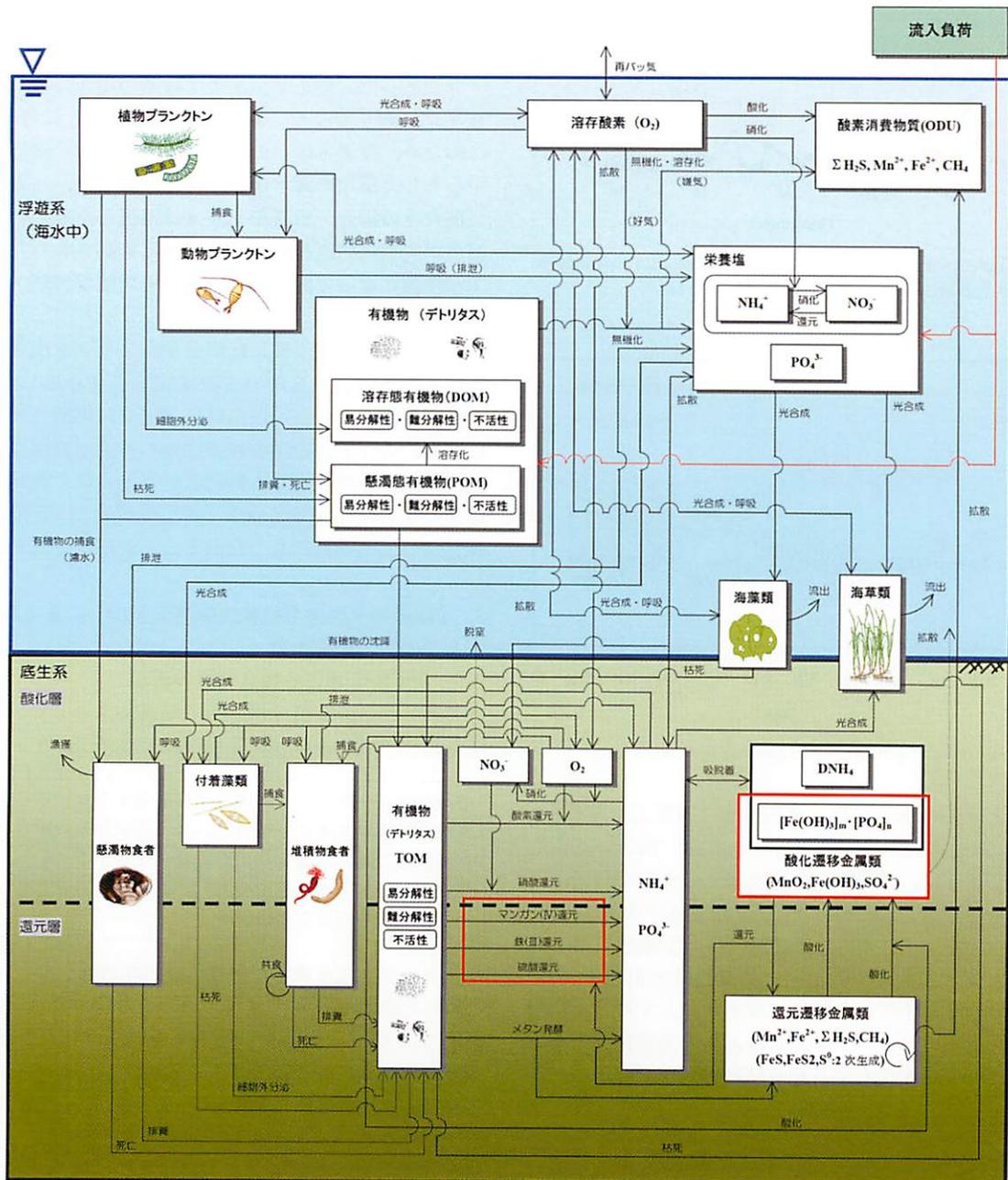


Fig. 10 Schematic view of model variables and material flow of biochemical processes.

スタディーとして、埋め戻し材の違いによる海域環境改善効果を予測した。なお埋め戻し面積は、322,500 m²、容積は 1284,750 m³である。

シミュレーションモデルは、流動モデルと「浮遊系-底生系結合生態系モデル」から構成されており、流動モデルは水温・塩分拡散を含む一般鉛直座標系を用いたσ座標モデル(海面と海底で規格化された座標系)を採用している。水平方向の分割は、外海に向けて段階的に計算格子が大きくなる可変長格子のモデルを用い、湾奥においては最小計算格子間隔として 150 m を、伊勢湾や三河湾湾口部などは 900 m の格子間隔とした。鉛直層分割は一般座標系による最大 14 層の層分割を多重シグマ座標系によって実現した。現況再現を確認する対象年としては、豊川河口において 9 月に苦潮によるアサリの大量死が発生した 2001 年を選定した。

浚渫地の埋め戻し材として、浚渫土、製鋼スラグ混合土の 2 種を想定し、スラグ混合土適用時には、前述の環境改善効果の条件設定を行った。また、2001 年 1 年間の環境条件下(気象・流量)において、埋め戻しの有無・埋め戻し材の違いによって水質・底質の状況がどのように変化するかという視点で予測を行った。

3.3 三河湾の浚渫地の埋め戻しを対象とした改善効果の予測

流動および水質計算結果について実測値との比較を行い、現況再現性の検証を行った。一例として、愛知県水産試験場のブイ(設置位置は Fig. 11 参照)による定点連続観測結果と計算結果の比較を Fig. 12 に示す。この結果を現況ケースとし、流動計算については、対象とする浚渫地の水深を周辺地盤高と同様とした計算を実施し、水質計算については、埋め戻し材を変えて埋め戻した計算をそれぞれ実施した。浚渫地における一年間の水質濃度変化を Fig. 13 に、夏季平均値を各予測ケースで比較したものを Table 2 に示す。表層クロロフィル a 濃度については年間を通して変化はみられないが、底層 T-N・T-P 濃度については主に夏季に修復後の濃度が低減する傾向がみられる。底層溶存酸素濃度については、夏季に貧酸素化する傾向は変わらないが、還元物質濃度(硫化水素等)が修復後に低減していることから、底泥および底層における酸素の循環に変化が生じているものと考えられる。還元物質濃度(硫化水素等)は、浚渫土を用いる場合よりもスラグ混合土を用いた場合の方がより低くなっており、硫化水素発生時の低減効果を持っていることがわかる。

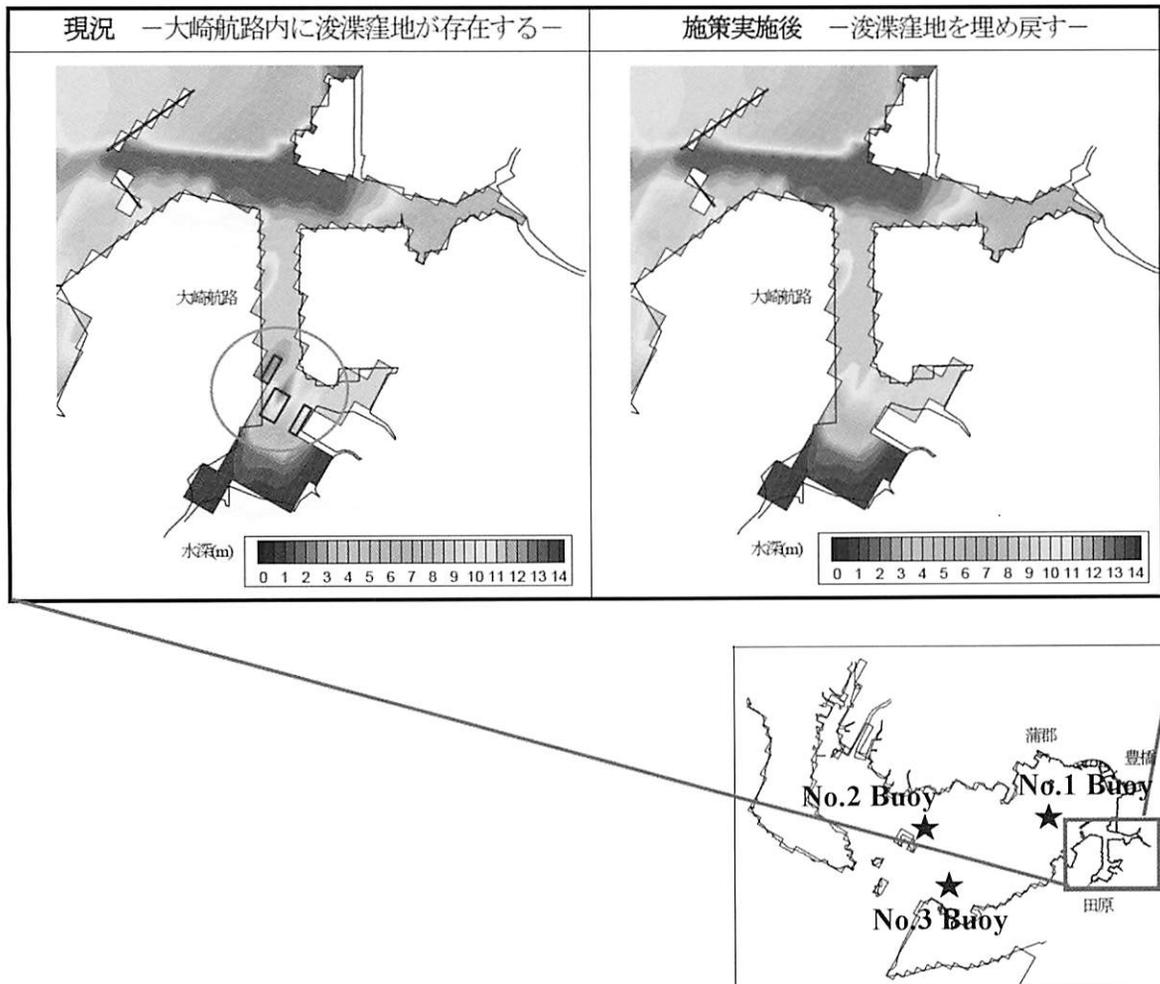
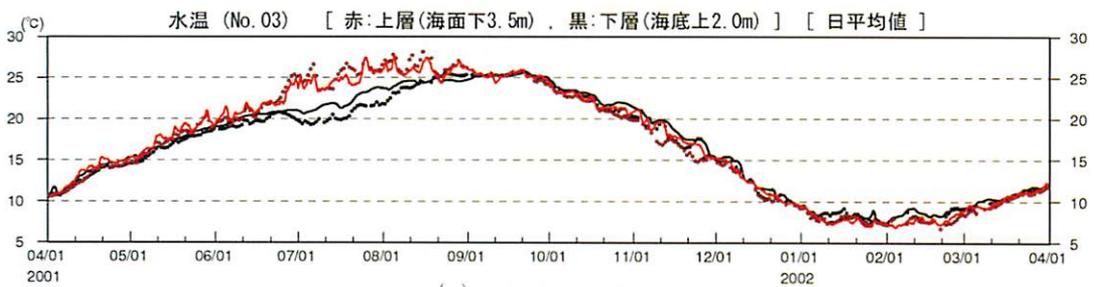
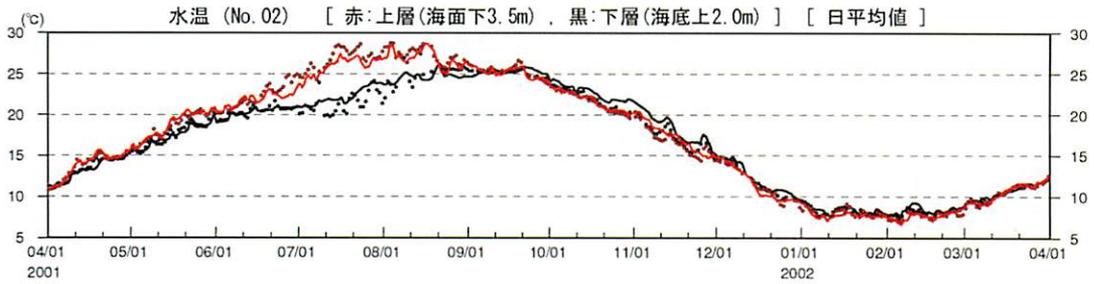
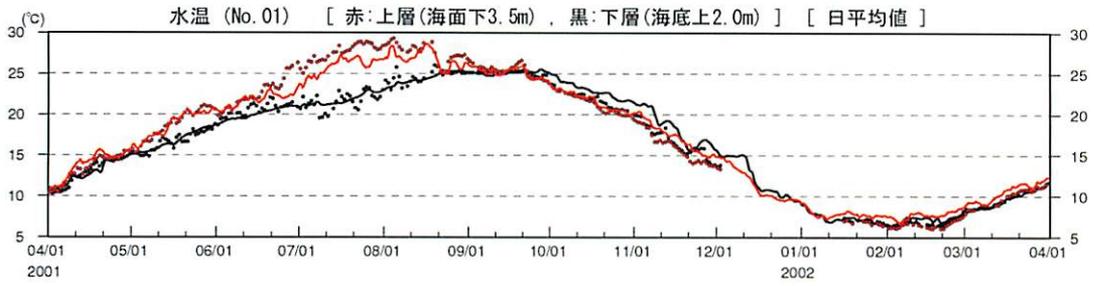
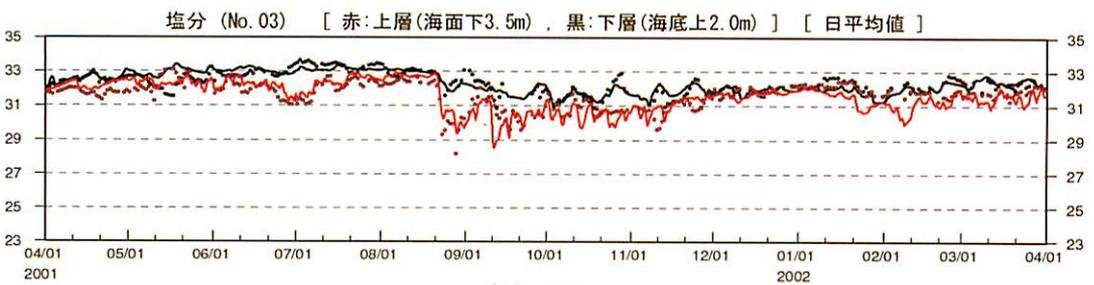
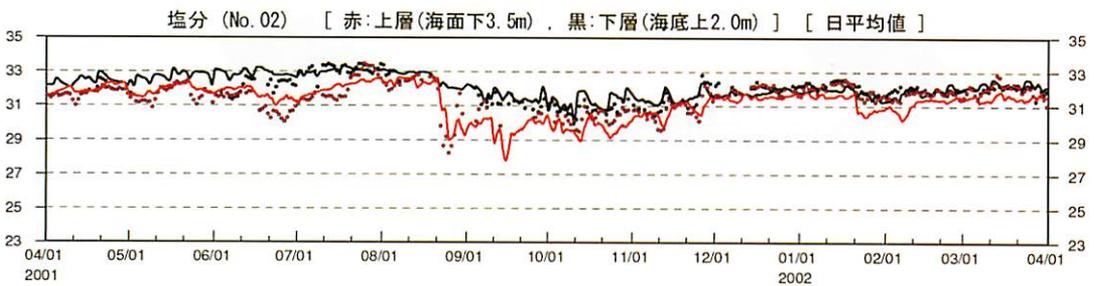
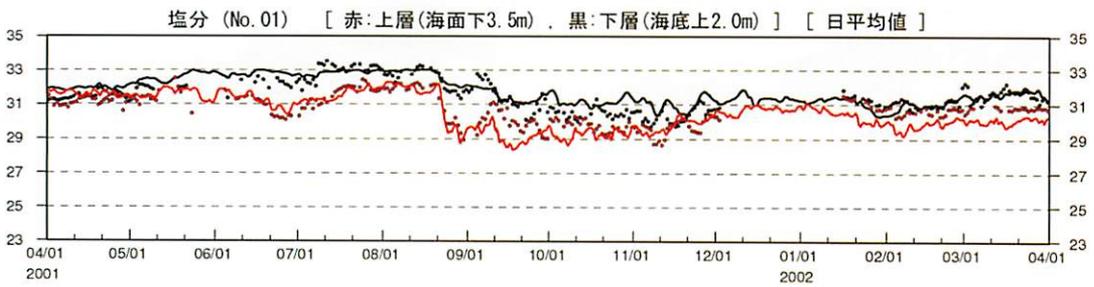


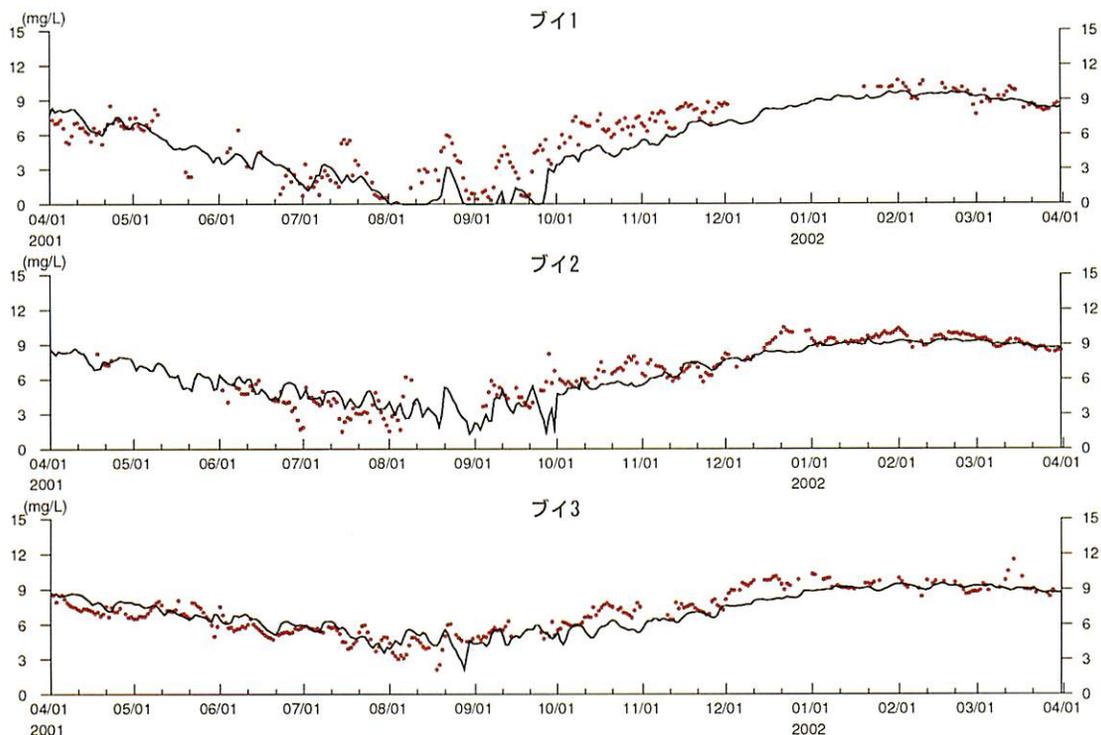
Fig. 11 Location of the borrow pit in Osaki route and observation buoys.



(a) water temperature



(b) salinity



(c) DO concentration of bottom layer

Fig. 12 Compare with calculation results and observation data.

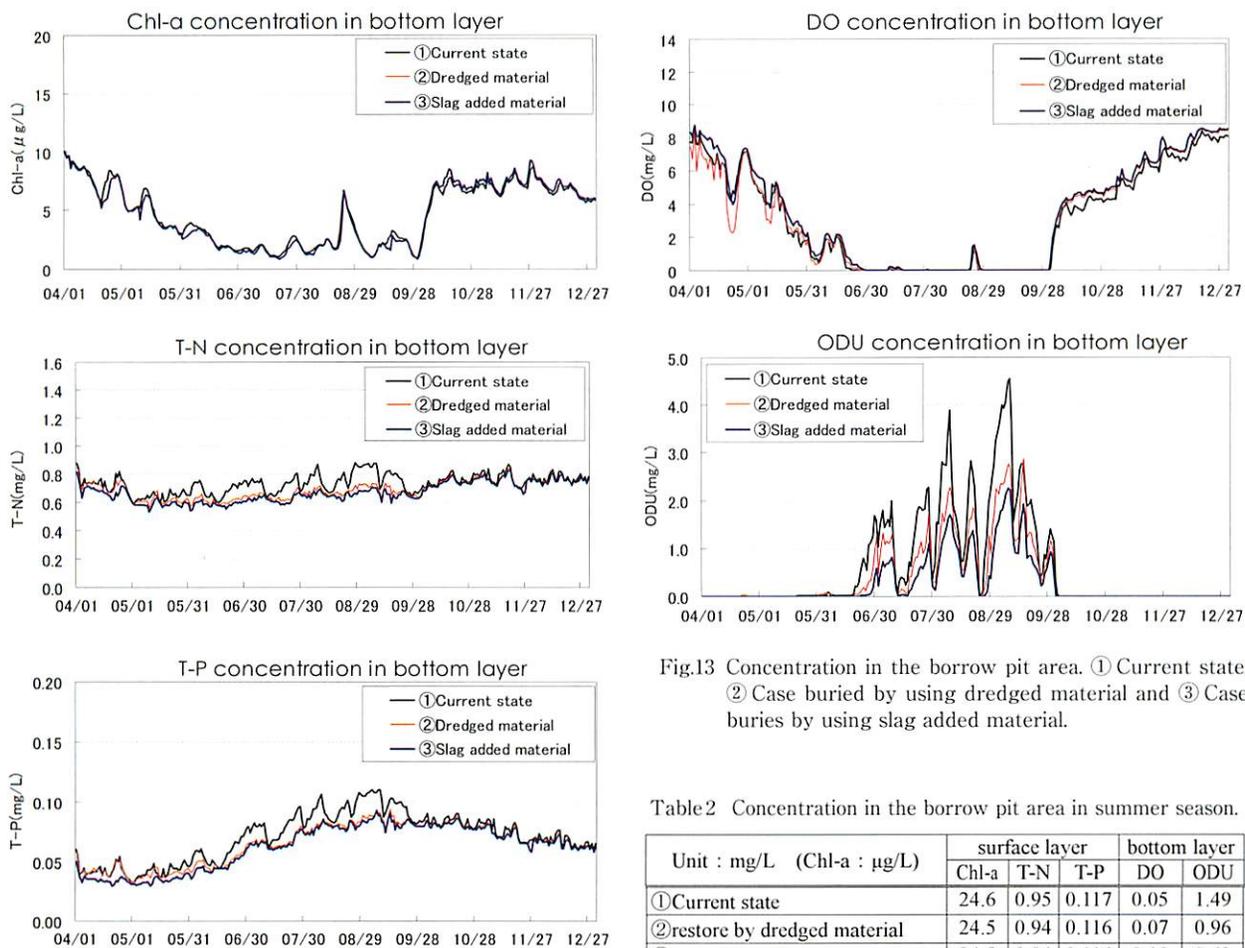


Fig.13 Concentration in the borrow pit area. ① Current state, ② Case buried by using dredged material and ③ Case buries by using slag added material.

Table2 Concentration in the borrow pit area in summer season.

Unit : mg/L (Chl-a : µg/L)	surface layer			bottom layer	
	Chl-a	T-N	T-P	DO	ODU
① Current state	24.6	0.95	0.117	0.05	1.49
② restore by dredged material	24.5	0.94	0.116	0.07	0.96
③ restore by slag mixture material	24.5	0.94	0.116	0.10	0.62

ODU is converted what in the oxygen demand as for the reducing substance such as Mn²⁺, Fe²⁺, HS⁻

また浚渫窪地における底泥からの栄養塩・還元物質の溶出量および酸素消費量の予測期間での平均値の比較を Fig. 14 に示す。図中の括弧内の数値は、現況の溶出量および酸素消費量の値を1とした時の各ケースの値の比率である。浚渫土を用いて埋め戻した場合、栄養塩および還元物質の溶出は現況より60%程度低減でき、スラグ混合土を用いた場合はさらに20%以上の低減効果が見込まれる結果となった。酸素消費量については、浚渫土を用いて埋め戻した場合の低減効果は約40%であり、スラグ混合土を用いた場合はさらに20%程度の低減効果が見込まれる結果となった。このように、浚渫窪地を埋め戻すことにより、底泥からの栄養塩・還元物質の溶出量および酸素消費量を低減し、環境への負荷を軽減することができると明らかとなった。また、埋め戻し材の種類により、底泥からの栄養塩・還元物質の溶出量および酸素消費量は変化しており、浚渫土よりスラグ混合土を用いた方が、低減効果が大きい結果となった。

さらに、実験結果より得られた環境改善効果として、スラグ混合土で埋め戻した後、水中より沈降する新生堆積物に対してもリン酸態リンと硫化物の溶出抑制効果があると仮定した場合と底泥内の嫌気分解が完全に抑制されると仮定した場合の計算を実施し、その効果を検討した。Fig. 15 に浚渫窪地における底泥からのリン酸態リンと還元物質の溶出量を示す。この結果では、どちらの仮定についても、リン酸態リンと還元物質の溶出量がさらに低減していることから、今後、新生堆積物に対する効果の検証や、底泥中の分解過程の抑制機構について検討する必要があると考えられる。

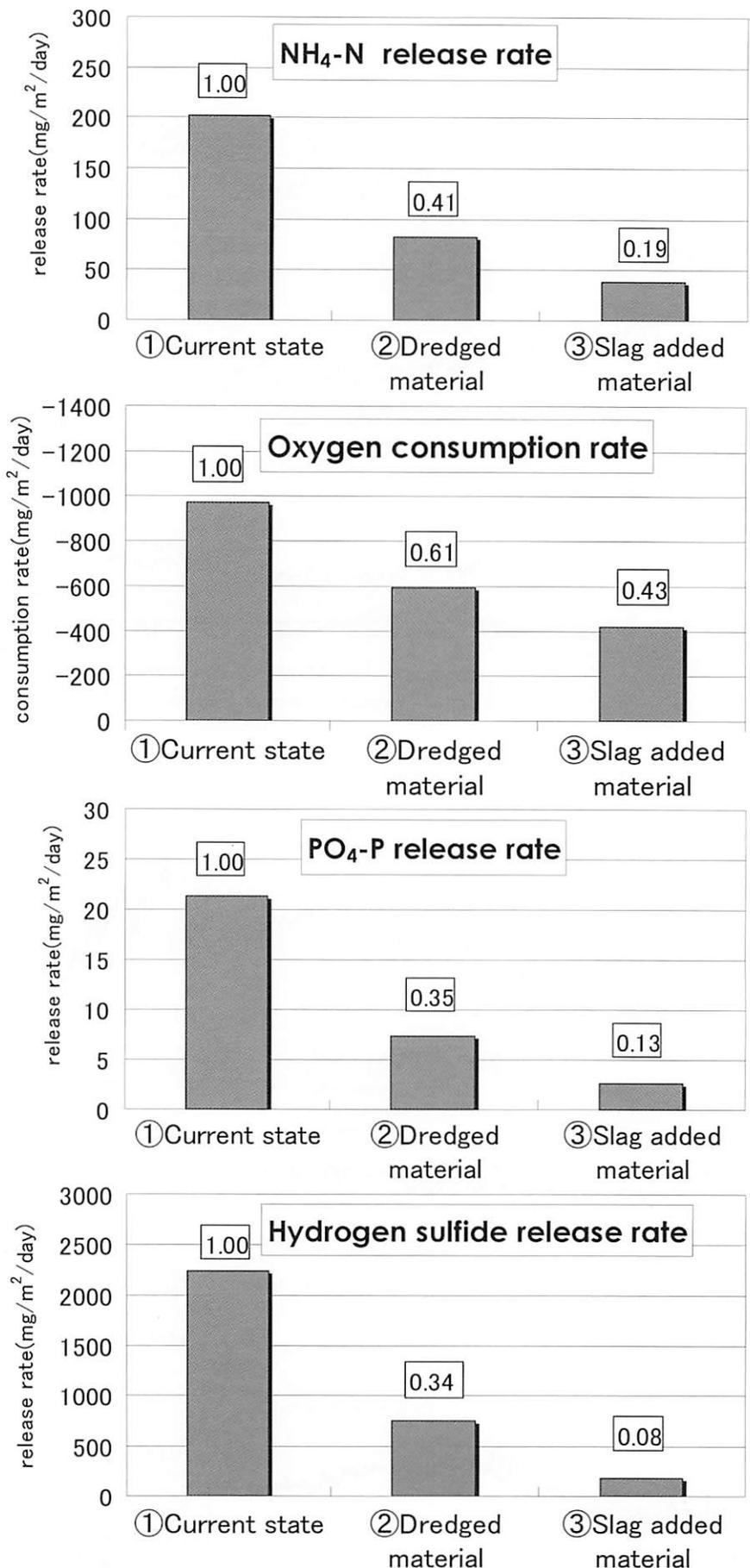


Fig.14 Flux from sediment in the borrow pit area when current state and restored by dredged material or slag added material.

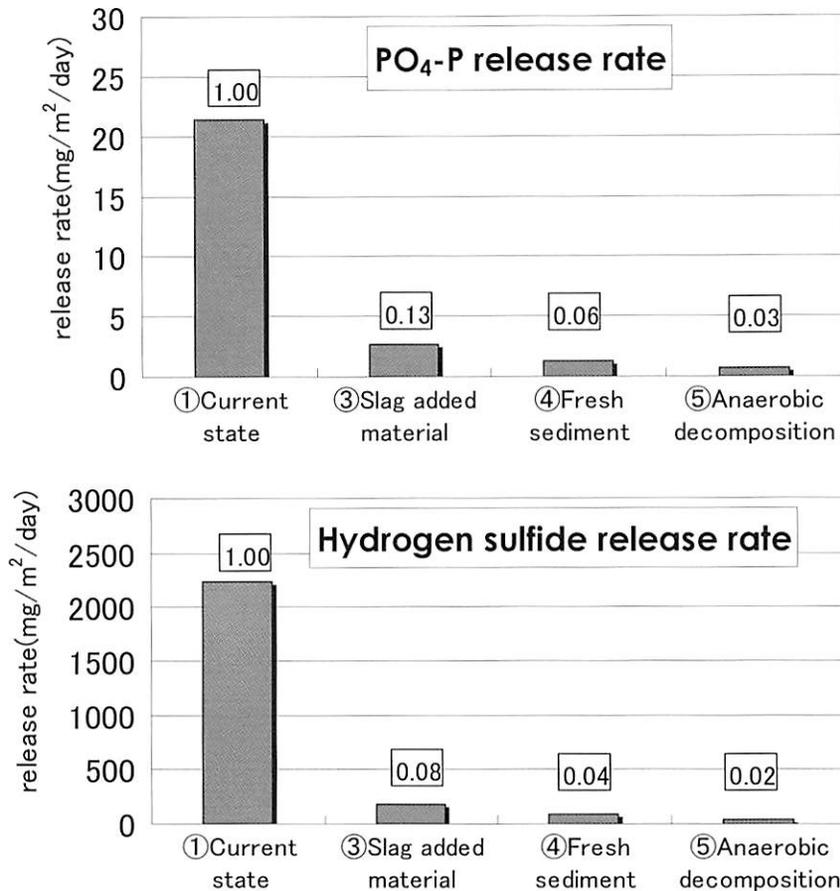


Fig. 15 Flux from sediment in the borrow pit area when current state and restored by slag added material.

4. 要約

本研究から得られた主要な結論を下記に示す。

- (1) 転炉系製鋼スラグを浚渫土砂に混合・改質することにより、浚渫土砂からのリン、硫化物の溶出や藻類の増殖を抑制できることを実験で検証できた。
- (2) 実海域への適用を想定したシミュレーションの結果、埋め立て材の種類によって水質濃度の改善効果に大きな違いはみられなかったが、生物に毒性が強い硫化水素等の還元物質の存在量の低減効果に着目すると、浚渫土よりスラグ混合土を用いた場合のほうがより改善効果が大きく、施工部直上水での還元物質濃度を指標とした場合、浚渫土に比べ1.4倍程度の改善効果であった。

参考文献

- 1) 中村由行, 2006, 東京湾における浚渫窪地の現状と問題点, 海洋理工学会平成18年度春季大会講演論文集, 1-4
- 2) 武田和也, 石田基雄, 2006, 三河湾における苦潮によるアサリ大量死と浚渫窪地内部の貧酸素化の状況, 海洋理工学会誌, Vol. 12, No. 2, 51-58
- 3) 石田基雄, 鈴木輝明, 2006, 三河湾における浚渫窪地修復事例と実現に至る経過, 海洋理工学会誌, Vol. 12, No. 2, 65-71
- 4) 金子健司, 橋口晴穂, 宮向智興, 今尾和正, 和久光靖, 石田基雄, 鈴木輝明, 2011, 浚渫窪地における底質の極度の悪化と底生生物群集の動態 - 三河湾の事例 -, 水環境学会誌, 34, 3, 47-55
- 5) 鈴木輝明, 武田和也, 本田是人, 石田基雄, 2003, 三河湾における環境修復事業の現状と課題, 海洋と生物, 146, 25, 3, 187-199
- 6) 中川雅夫, 赤司有三, 木曾英滋, 柴崎徹, 2011, 転炉系製鋼スラグを用いた海域環境修復技術, 海洋理工学会平成22年度秋季大会講演論文集, 37-46
- 7) 三木理, 加藤敏朗, 堤直人, 2009, 炭酸化製鋼スラグを活用した海域底質からのリンの溶出防止, 水環境学会誌, 32, 1, 33-39
- 8) 三木理, 加藤敏朗, 中川雅夫, 堤直人, 2009, 転炉系製鋼スラグを活用した海域底質改善の基礎的検討, 日本水産工学会学術講演会
- 9) 永尾謙太郎, 畑恭子, 芳川忍, 細田昌広, 藤原建紀, 2008, 水質改善対策の評価を目的とした浮遊系-底生系結合生態系モデルの開発と適用, 海岸工学論文集, 第55巻, 1191-1195
- 10) 芳川忍, 永尾謙太郎, 畑恭子, 細田昌広, 中田喜三郎, 2007, 浮遊系-底生系結合生態系モデルによる環境改善策の検討, 海洋理工学会平成19年度春季

大会講演論文集

- 11) NERI Technical Report, 2004, A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay, 483, 19-21
- 12) 岡市友利編, 1997, 赤潮の科学(第二版), 恒星社厚生閣
- 13) 環境庁水質保全局水質管理課編, 1996, 底質調査法とその解説(改定版), 日本環境測定分析協会
- 14) W・スタム, J・J・モーガン, 1974, 一般水質化学, 共立出版
- 15) 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所, 2008, 三河港湾事務所だより Mini-WAN, 2008年3月号

* * * * *

Prediction of Marine Environment Improvement by Steelmaking Slag applied to Borrow Pits in the Seabed

Osamu Miki ^{*1}, Chika Ueki ^{*1}, Yuzoh Akashi ^{*1}, Masao Nakagawa ^{*1}, Kyoko Hata ^{*2}, Kentaro Nagao ^{*2}, Tsutomu Kasahara ^{*2}, and Teruaki Suzuki ^{*3}

^{*1} *Nippon Steel Corporation, 20-1, Shintomi, Futsu, Chiba, 293-8511, Japan*

^{*2} *Idea Consultants, Inc., 2-2-2, Hayahuchi, Tsuzuki, Yokohama, Kanagawa 224-0025, Japan*

^{*3} *Graduate School of Environmental & Human Science, Meijo University, 1-501, Siogamaguchi, Tenpaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan*

Received : May, 31. 2011. Accepted : August, 19. 2011