

新たに造成される浅場の機能評価モデルの開発に向けた底質劣化に関する研究

入江政安

大阪大学大学院工学研究科・講師

1. 研究目的

水環境改善施策として新たに造成される人工干潟や人工海浜は、水環境改善のためであるが故に、水質の面では恵まれない水域に設置されることが多い。水質が良くない水域に設置されるこれらの浅場は、活発な内部生産により、新生堆積物が底面状に蓄積する。この堆積物が新たな水質汚濁源となることにより、造成当初の機能が失われることがある。本研究は、底質劣化とその水域への影響を明らかにするため、底質モデルを構築し、同時に実施する現地調査結果と比較することにより、再現性を確保する。そのうえで、底質の汚濁要因及び水質への影響解析を行うことを目的とする。

2. 研究方法

2.1 底質調査および室内分析

底質調査は大阪湾奥部の尼崎西宮芦屋港の、さらに港最奥部に位置する甲子園浜で実施した。甲子園浜の前面海域は、夏季において貧酸素水塊の形成が確認される海域であり、青潮の発生も確認されており、気象条件や地形にもよるが、底層の貧酸素化、および青潮の発生要因である硫化水素の生成・蓄積が生じやすい水域である。

調査は2009年8月31日（夏季）および2010年2月9日（冬季）に実施した。夏季調査では浅海域における底質がどのように水質に影響を及ぼし、貧酸素水塊を形成しているのかを把握するため、調査地点を東経135°21'の経度線上で水深2m, 3m, 4mとなる地点を観測点とした。冬季は調査では、夏季の調査地点のうち水深3mのみを対象とし、室内実験により、水温の影響を明らかにしようとした。

底質調査では直径11cmの亚克力パイプ又は直径10.6cmの塩化ビニルパイプを用いて泥深25~30cmの不攪乱柱状泥として採泥を行い、底質分析および酸素消費速度、栄養塩溶出速度の実験を行った。底質分析に用いた試料は現地で0~2cm, 2~5cm, 5~10cm, 10~15cm, 15~20cm, 20~25cmの6層（一部5層）に分取し、泥温・ORPを測定するとともに、底質分析用として持ち帰ったものである。表-1に調査内容および調査項目についてまとめたものを示す。

表-1 調査内容および調査項目

調査内容の区分		調査項目
底質分析	土粒子	含水比, 強熱減量, ORP, T-S, T-N, NH ₄ -N, T-P, I-P, Al-P, Fe-P, Ca-P
	間隙水	T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, T-P, PO ₄ -P, SiO ₂ , ΣH ₂ S, SO ₄ ²⁻
溶出速度実験		T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, T-P, PO ₄ -P, SiO ₂ , ΣH ₂ S
酸素消費速度実験		DO

2.2 底質モデルの概要

本研究で用いた底質モデルは、Wijsman ら(2002)、Fossing ら(2004)の研究を基に、構築した底泥中の土粒子および間隙水中における各物質間の生物化学的相互作用を考慮した鉛直1次元モデルである。このモデルは底質内の炭素・窒素および硫黄を要素としてモデル化したものであり、有機物の堆積から無機化する過程を含む底泥内における物質の酸化還元過程を表現している。

モデルの概念図を図-1 に示す。水中から堆積する有機物は底泥内で分解されるが、その過程（図中太線矢印）は有酸素下の有機物分解、脱窒、マンガン還元、鉄還元、硫酸還元で進行する。これらの化学反応を表-2 に示す。本研究で考慮している物質は太字で示している。通常、今回の調査水域では、ほとんど表層から底泥は還元状態である。この場合、脱窒作用にともなう硝酸イオンの供給により、また、硝酸イオンが欠乏した場合にはマンガン・鉄酸化物により、これらも欠乏すると、硫酸イオンを用いる硫酸還元菌の作用により、有機物が分解される。これらは一方的に進むのではなく、上位の酸化剤が供給され、酸化されやすい下位の物質が残っている場合には再酸化される。HS⁻（ΣH₂Sの一部）はFe²⁺の供給によりFeSとなり、沈殿をおこし、いずれパイライトとなりより安定的な土構成物となる。

モデルにおける底泥内の構造は鉛直方向に層厚1cm×25層で分割し、全25層泥深25cmまでとした。底質の初期条件については底泥内の各物質の濃度を0とし、境界条件において堆積フラックスおよび直上水水質の値をそれぞれの地点において決定することで良好な再現性を得られるようにした。ここでは、易分解性の有機物が主にプランクトン由来の有機物であるとして有機物のフラックスに季節変化を与えた。モデルの適用においては有機物フラックスを季節変動による堆積量の違いを与えるため、1年を1周期とした非定常状態で再現計算を行った。

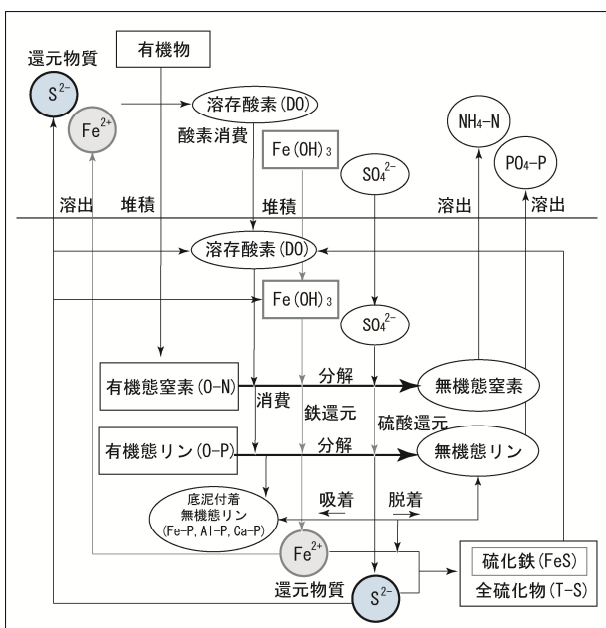


図-1 底質モデルの概念図

表-2 底泥内の無機化過程（太字はモデルに組み込まれた項目，x, yは有機物内のそれぞれ，N/P モル比，C/P モル比を示す。）
(Wijsman et al.をもとに作成)

一次反応系	反応式
有酸素下分解	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+x\text{O}_2+y\text{H}^+$ $\rightarrow x\text{CO}_2+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++x\text{H}_2\text{O}$
脱窒	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+4/5x\text{NO}_3^-+(4/5x+y)\text{H}^+$ $\rightarrow x\text{CO}_2+y\text{NH}_4^++2/5x\text{N}_2+\text{HPO}_4^{2-}+7/5x\text{H}_2\text{O}$
マンガンによる異化的還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+2x\text{MnO}_2+(4x+y)\text{H}^+$ $\rightarrow x\text{CO}_2+2x\text{Mn}^{2+}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++3x\text{H}_2\text{O}$
鉄による異化的還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+4x\text{Fe}(\text{OH})_3+(8x+y)\text{H}^+$ $\rightarrow x\text{CO}_2+4x\text{Fe}^{2+}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^++11x\text{H}_2\text{O}$
硫酸還元	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+1/2x\text{SO}_4^{2-}+(1/2x+y)\text{H}^+$ $\rightarrow x\text{CO}_2+1/2x\text{H}_2\text{S}+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+\text{H}^++x\text{H}_2\text{O}$
メタン生成	$(\text{CH}_2\text{O})_x(\text{NH}_3)_y(\text{H}_3\text{PO}_4)+y\text{H}^+$ $\rightarrow 1/2x\text{CO}_2+1/2x\text{CH}_4+y\text{NH}_4^++\text{HPO}_4^{2-}+2\text{H}^+$

3. 主要な結果と考察

3.1 現地観測結果および再現計算結果による底質特性の解析

底泥内における間隙水中のアンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ と硫化水素濃度 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ の鉛直分布について、観測値と計算値を図-2 に示す。甲子園浜の底質についてはそれぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに濃度の鉛直分布において良好な再現性が得られている。有機物フラックスを変化されることにより、これらの分布特性を再現しているが、易分解性の有機物割合を 0.7~0.99 の範囲で与えている。甲子園浜の堆積物の特性としては河川が流入しない水域であることと、水深が浅いために易分解性の有機物が供給されやすいことが挙げられる。これらの性質から、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに表層付近で濃度が高く、また、特に水深 4m の調査点では有機物の分解量が多く $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\Sigma \text{H}_2\text{S}$ とともに最大となっている。

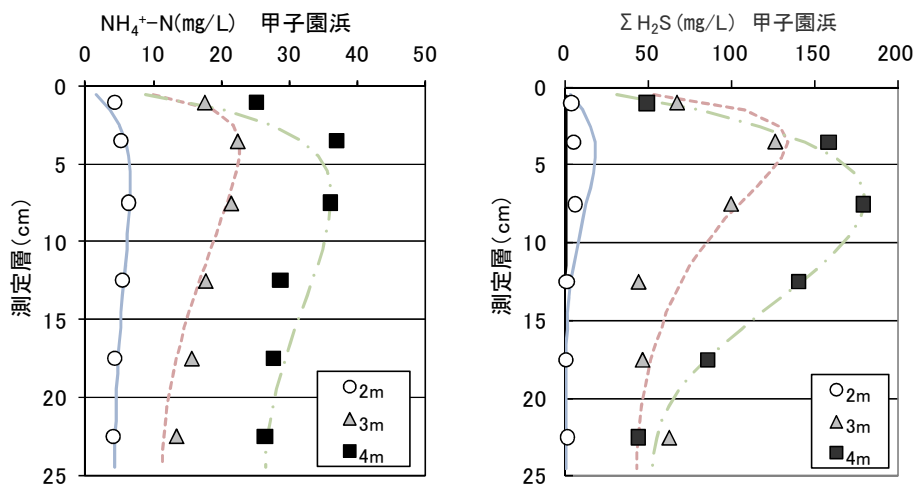


図-2 観測値と再現計算結果(点:観測値,線:計算値)(左: $\text{NH}_4\text{-N}$,右: $\Sigma \text{H}_2\text{S}$)

3.2 酸素消費速度の季節変化からみた新生堆積物の影響

表-3 に夏季及び冬季の底質による酸素消費速度を示す。酸素消費速度は採取した不攪乱柱状泥の直上水の溶存酸素濃度を飽和状態にし、実験開始から 6 時間経過後までの直上水の DO 消費量を用いて算出したものである。夏季の底質による酸素消費速度は、水深 3 m の底質で最大の $5.31 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、次に水深 4 m の地点で $3.35 \text{ g/m}^2/\text{day}$ と底質に有機物・硫化物が多く含まれる地点で酸素消費速度が大きかった。これは大阪湾奥部の北部港湾域の酸素消費速度が $2.09 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であることに比べても底質による酸素消費が著しい環境であるといえる。一方、冬季の酸素消費速度は現地水温 (13°C) で室内実験を行った場合 $1.38 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、実験室に持ち帰り速やかに泥温および水温を 25°C にして実施した場合 $3.23 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であった。サンプリング数が不十分であるため、サンプルの個体差の可能性を排除できないが、夏季と冬季の酸素消費速度には明らかな差が認められ、夏季水温条件下で冬季の底質の酸素消費速度を計測しても、夏季ほどには酸素が消費されないことから、新生堆積物の分解が底質による酸素消費に応分に寄与していることが推察される。

表-3 底質による酸素消費速度

季節	地点	設定温度 (°C)	酸素消費速度 (g/m ² /day)
夏季	水深 2m 地点	25	1.73
	水深 3m 地点	25	5.31
	水深 4m 地点	25	3.35
冬季	水深 3m 地点	13	1.38
	水深 3m 地点	25	3.23

4. 主要な結論

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 適用した底質モデルは、多くの生物化学反応を組み込んだ複雑なモデルであるが、汚濁が進んだ底質環境、および異なる水域の底質に対しても適用可能であることが示唆された。また、未測定物質についても再現計算を行うことによりある程度特性を把握することが可能である。
- 栄養塩、還元物質の溶出に関しては間隙水中と直上水中の物質の濃度差により拡散・溶出することが既に知られているが、本モデルにおいても同様の結果が得られた。また、栄養塩溶出速度および酸素消費速度に関しては間隙水中の物質濃度だけでなく、有機物の分解特性についても考慮することで実測値に近い再現性になる。
- 夏季および冬季における底質の酸素消費速度を計測した結果、夏季の底質による酸素消費には、その年の新生堆積物の影響が無視できない。
- 本研究で用いたモデルは底質の将来予測に適用可能であることが分かった。しかし、新生堆積物による短期的な酸素消費と底泥中に蓄積した還元物質による中長期的な酸素消費の分画には至らなかった。中長期的な酸素消費については、底質内の物質の挙動について、安定同位体比分析等を用いたさらなる調査が必要である。特に硫化水素イオンの挙動が重要であると考えられるので、硫化水素イオンの固定法・採取法を検討する必要がある。その上で、現在各物質の物性と単純な式で与えられている鉛直方向拡散係数について精査し、モデルの向上を図ることが重要である。この中長期の酸素消費機構の再現性向上により、新生堆積物の水質に与える影響の定量化が可能になると考えられる。
- 底質モデルの解析によると、還元物質の生成とその水域への回帰には鉄イオンおよびマンガンイオンの供給が重要となる。これらの陸域からの水域への供給と水域内の分布について精査する必要がある。夏季の出水時のこれらの金属イオンの供給により、底質による酸素消費が抑制されていることも考えられる。この方向での検討をさらに進めることで、夏季出水時の強風による鉛直混合等、これまで考えられていた貧酸素水塊縮小の要因とは異なる新しい知見が得られる可能性が指摘される。