

横浜港の底泥からの栄養塩の溶出と覆砂の効果 に関する現地調査と室内実験

FIELD OBSERVATION AND LABORATORY TEST
FOR NUTRIENT RELEASE REDUCTION
FROM BOTTOM SEDIMENTS WITH SAND CAPPING AT YOKOHAMA PORT

信澤雄一郎¹・村上和男²・北村友裕³・小泉俊昌⁴・亀山豊⁵・小松勝久⁶
Yuichiro NOBUSAWA, Kazuo MURAKAMI, Tomohiro KITAMURA, Toshimasa KOIZUMI
Yutaka KAMEYAMA and Katsuhisa KOMATSU

¹工修 西原環境テクノロジー㈱ 東京本社 (〒108-0023 東京都港区芝浦3-6-18)

²正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科 (〒158-0087 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

³角藤㈱ 首都圏基礎建材本部 (〒101-0047 東京都千代田区内神田3-23-5)

⁴学生会員 武蔵工業大学 工学研究科都市基盤工学専攻 (〒158-0087 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

⁵国土交通省 (前) 横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 神奈川県横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

⁶国土交通省 (前) 横浜港湾空港技術調査事務所 (〒221-0053 神奈川県横浜市神奈川区橋本町2-1-4)

This paper describes the lasting effect of nutrient release reduction from bottom sediments with sand capping at Yokohama Port. The water quality in Tokyo Bay is still contaminated because of a large amount of nutrient release from contaminated sediments. In order to reduce the nutrient release from the sediments, Yokohama Municipal Government conducted a sand capping construction at Yokohama Port. In the study, we carried out the undisturbed bottom sediment sampling at Yokohama Port, and carried out the laboratory tests for nutrient release rate from the sediments. From the study, it is found that the nutrient release rate from the sediments without sand capping is larger than the sediments with sand capping. Therefore it is considered that the effect of sand capping on nutrient release reduction still maintains for 5 to 10 years after the construction.

Key Words : Contaminated Sediments, Nutrient Release, Sand Capping, Laboratory Test,
Yokohama Port

1. はじめに

東京湾に流入する栄養塩等の汚染負荷量は、1970年代後半から比べるとかなりの減少がみられる。しかしながら、毎年のように赤潮が発生し、また貧酸素水塊の形成も夏期には常態化している。この原因の一つとして、海底に堆積した底泥からの栄養塩の溶出が考えられており、東京湾の水質を改善するためには底質改善を行う必要性が云われている。底質改善施策の一つとして、溶出量を削減する目的で覆砂工法が提案されており、実際にいくつかの海域で実施されている。本研究は、この覆砂工法による溶出量の削減効果と、その覆砂効果の持続性についての検討を、現地調査および室内実験で行った。

東京湾の横浜港内の底質は汚染され、夏期の躍層期に

は多くの栄養塩が海水中に溶出しているものと思われる。この栄養塩の溶出量を削減する目的で、横浜港は横浜港奥部のみならずみらい周辺海域で覆砂工事を実施している。しかしながら、底質改善による水質改善を有効的に行うためには、覆砂工事後に新たに新生堆積物が堆積した場合の覆砂の溶出削減効果、言い換えれば覆砂の持続性の検討が重要である。対象となる底泥は、図-1 に示した横浜港奥部のみならずみらい周辺の地点のもので、平成16年12月13日に採泥した。st.1, st.2, st.3の地点の泥は柱状採泥及び表層泥を採取し、st.4, st.5は表層泥のみ採取した。st.1は覆砂を行っていない地点であり、st.2, st.3はそれぞれ平成6年度、平成10年度に覆砂を行った地点である。溶出実験はst.1, st.2, st.3の地点の泥で行い、st.1からst.5の表層泥で底質の分析を行った。溶出実験を行うことにより、

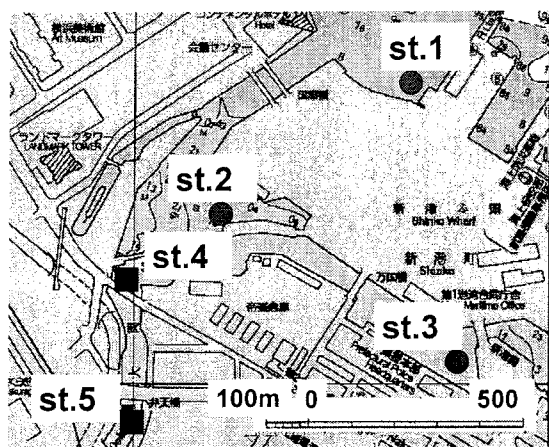


図-1 調査地点 (横浜市みなとみらい地区)

それぞれの地点の底泥から溶出する栄養塩の溶出量と溶出速度をもとめることで、底泥の状態及び覆砂の効果を把握する。表層泥の分析を行うことにより、各地点の底質の状態を把握する。なお夏期の底質の観測結果及び分析結果は、平成16年8月27日に国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所の調査データ¹⁾を使用する。

2. 水質調査及び底質調査

(1) 現場の水質(冬期)

採泥地点の水質は多項目水質計で測定した。測定項目は水温、塩分、DO、濁度、クロロフィルaである。採泥地点の水深は、それぞれst.1が10.3m、st.2が3.5m、st.3が3.6mであった。st.1の水温は、表層で約15℃、底層で約17℃であり、12月の平年の東京湾の水温よりやや高めの水温であった。st.2、3の水温は約15℃であり、東京湾の平年よりやや高めの水温であった。st.1の塩分は、表層で約29 psu、底層で31.5 psuであった。st.2、3の塩分は共に約29psuであった。st.1のDOは表層で約6mg/Lで、底層で約4mg/Lであり、時期的に混合期であるので底泥が若干酸素を消費していることを確認できるが、貧酸素までにはいかなかった。st.2、3のDOは共に6mg/Lであり、通常の好気状態であった。st.1の濁度は表層で約2度、底層で約7～9度であった。st.2、3の濁度は約2度であった。st.1、2、3のクロロフィルaも約1μg/L程度であったことから表層は比較的澄んだ海水であったといえる。

表-1、2にそれぞれ底層の海水中的窒素とリンの分析結果を示す。栄養塩の値は、平均的な東京湾での値であった。st.2とst.3のリン酸態リンの値が全リンよりも少し高い値を示しているのは、理論上おかしいが、分析による誤差であると考えられる。分析の誤差として考えられるのは、採取した試料は冷蔵保存したが、分析は試料採取後2日経過したことと、手分析を行ったことによる誤差である。また、3地点のリンの中でリン酸態リンの割合が多いといえる。これは測定地点のDOの値が高い

表-1 調査地点での海水中の窒素の分析結果

	NO ₂ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	T-N (mg/L)
st.1	0.0381	0.552	0.0726	1.32
st.2	0.0357	0.441	0.0808	1.27
st.3	0.0370	0.571	0.0969	1.39

表-2 調査地点での海水中のリンの分析結果

	PO ₄ -P (mg/L)	T-P (mg/L)
st.1	0.0529	0.0530
st.2	0.0672	0.0583
st.3	0.0687	0.0618

ためにリン酸態リンの割合が多くなったと考えられる。

(2) 現場の底質(冬期及び夏期)

a) 冬期の底質

直径10cm、長さ150cmのアクリルパイプを用いて、観測用の不攪乱柱状泥を採取して船上で目視観測した。分析用の泥は、エックマンバージで、底泥の表層を採泥したものを使用した。表-3、4にそれぞれ冬期の底質の観測結果と分析結果を示す。なお、ここでのヘドロとはシルト分と粘度分が混合し硫化水素臭がしたものをいう。

st.1の泥は全体的にヘドロの状態であった。st.2の泥は全体的に砂であった。st.2の泥は海底から1cmにはヘドロが堆積していて、海底1cmから10cmまではヘドロ混じりの砂であった。st.3の泥は、海底から5cmまでがヘドロで、海底5cmから10cmまでがヘドロ混じりの砂であった。

表-3より、st.1、st.4、st.5の泥は硫化水素臭がしたが、st.2、st.3の泥は無臭であった。これは、st.1、st.4、st.5の泥はヘドロを多く含んでいるために硫化水素臭がして、st.2、3の泥は砂を多く含んでいるために無臭であったためと考えられる。またORPの値もst.1、st.4、st.5の泥は還元値を示した。

表-4より、st.1、st.4、st.5の泥は、全窒素、全リンの値が高い値を示し、COD、含水率、強熱減量が高い値を示した。粒度分布においても、シルト分が最も多く次いで粘土分が多かった。このことから、st.1、st.4、st.5の泥は性質が同じ泥であるといえる。また、st.1のヘドロはst.4、st.5の地点である大岡川から流れてきたものであると考えられるが、断定は出来ない。

st.2の泥はst.3の泥と比べて礫分を少し多く含んでいる以外、ほとんど同じ状態であるといえる。st.2の泥はst.3の泥よりも4年早く覆砂を行っているのに状態はst.3の泥とほとんど同じであった。

b) 夏期の底質

st.1の泥は冬期の表層と外観は同じで、全体的にヘドロの状態であった。st.2の泥は海底から10～15cmまでがヘドロで、15cmから30cmまでが砂混じりのヘドロであった。st.3の泥は海底から5cmまでがヘドロで、5cmから25cmまでが砂混じりのヘドロであった。st.2の泥とst.3

表-3 冬季の表層泥の底質の目視観測結果

	st. 1	st. 2	st. 3	st. 4	st. 5
泥 温 (°C)	16.9	16.6	16.1	16.6	16.3
臭 気	硫化水素臭	無臭	無臭	硫化水素臭	硫化水素臭
外 観	シルト	砂混じりシルト	シルト混じり砂	シルト	シルト
泥 色	5GY3/1	2.5GY3/1	5GY3/1	7.5GY3/1	10GY3/1
	暗オリーブ灰	暗オリーブ灰	暗オリーブ灰	暗緑灰	暗緑灰
混入物	無し	貝片多数	貝片	貝片多数、木片	布、木片
現場測定 ORP (mV)	-119	82	11	-59	-99

表-4 冬季の表層泥の底質の分析結果

調査地点		st.1	st.2	st.3	st.4	st.5
分析項目	単位					
全窒素(T-N)	mg/g乾泥	3.1	0.86	0.80	2.8	4.5
全リン(T-P)	mg/g乾泥	0.74	0.27	0.25	0.89	1.1
化学的酸素要求量(COD)	mg/g乾泥	22	5.3	5.5	22	37
含水率	%	73.8	35.8	35.5	63.2	72.1
強熱減量	%	9.2	2.9	2.5	9.7	13.9
粒度分布	礫分	0	9	0	1	0
	砂分	11	69	79	17	6
	シルト分	59	15	14	55	64
	粘土分	30	7	7	27	30

表-5 夏期の表層泥の底質の目視観測結果¹⁾

	st. 1	st. 2	st. 3
泥 温 (°C)	16.9	16.6	16.1
臭 気	硫化水素臭	無臭	無臭
外 観	シルト	砂混じりシルト	シルト混じり砂
泥 色	5GY3/1	2.5GY3/1	5GY3/1
	暗オリーブ灰	暗オリーブ灰	暗オリーブ灰
混入物	無し	貝片多数	貝片
現場測定 ORP (mV)	-119	82	11

表-6 夏期の表層泥の底質の分析結果¹⁾

調査地点		st.1	st.2	st.3
分析項目	単位			
全窒素(T-N)	mg/g乾泥	3.6	1.20	0.80
全リン(T-P)	mg/g乾泥	0.84	0.37	0.30
化学的酸素要求量(COD)	mg/g乾泥	23	8.9	6.9
含水率	%	339	83.2	67.6
強熱減量	%	11	4	3
粒度分布	礫分	0	7	0
	砂分	6	68	76
	シルト分	44	9	11
	粘土分	50	16	13

の泥は、冬に採泥した泥と比較すると含水比の高い状態であった。

st.2の泥は、夏期ではヘドロが堆積していたが、冬期ではほとんどなくなっていた。この理由として考えられるのは、平成16年度は比較的台風などの大雨が多かった年で、st.2付近は大岡川の河口にあるため、大水の時にヘドロも一緒に湾に流れてしまったのではないかと考えられる。しかし、明確な原因は不明である。ヘドロの海底で

の移動等の挙動に関しては、今後の検討課題の一つになるものと思われる。

表-5, 6 にそれぞれ夏期の底質の観測結果と分析結果を示す。表-5 より夏期の泥は、全体的に強い硫化水素であった。これはヘドロの影響によるといえる。

st.1の泥の状態は、冬期と同様に強熱減量が高く、CODが高いため、有機物を多く含んだ泥といえる。st.1の泥の状態は、含水率が夏期の方が大幅に多く、全リンが夏期

の方が少し高い値であったこと以外は、冬期の状態とほとんど変わらなかった。

st.2の泥の状態は、全体的に夏期の方が高い値となっている。粒度分布は、夏期の時の泥と比べて冬期の方が粘土分は少なくなり、シルト分は増加して、粘土よりもシルトが多くなった。

st.3の泥の状態は、全窒素は同じ値で、それ以外はst.2の泥と同様に、全体的に夏期の方が高い値となっている。粒度分布も同様に、冬期の方が粘土分は少なくなっており、シルト分は増加して、粘土よりもシルトが多くなった。

st.2の泥とst.3の泥を比べると、冬期ではほとんど底質は同じであったが、夏期ではst.2の泥の方が全窒素、全リン、COD、含水率、強熱減量と全ての項目でst.3の泥よりも高い値を示している。この二つの地点は、冬期にはそれぞれの項目でほぼ同じ値を示しているの、st.2の泥のそれぞれの項目の減少は大きい。この減少の原因は、観測結果からわかるようにヘドロの減少によるものであると考えられる。st.1の泥が夏期と冬期とで状態があまり変わらないことから、st.2のヘドロはst.3方面よりもst.1方面に流れたと考えることが妥当であると考えられる。

表-7 実験条件

実験期間	実験開始から72時間後まで
採水頻度	0, 2, 4, 6, 10, 24, 48, 72時間の8回採水
水温条件	20℃
DO条件	嫌気状態と好気状態
照度条件	暗条件

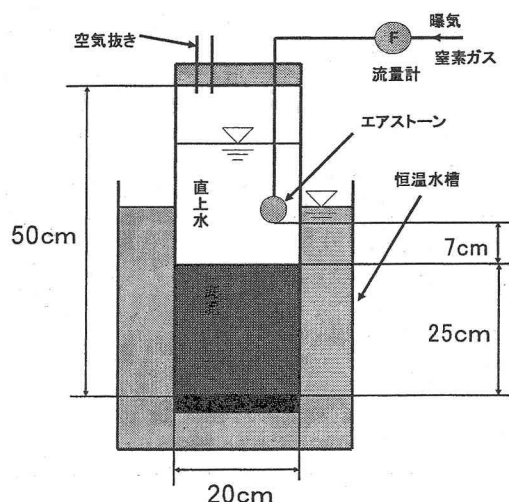


図-2 溶出実験装置

3. 底泥からの栄養塩の溶出実験(冬期の泥)

(1) 溶出実験条件

本研究での溶出実験は、底泥コアサンプルを用いた擬似現場法(コア法)で行う。海底からコア状の不攪乱柱状泥を採取し、それを実験室に持ち帰って現場に近い環境条件(水温、DO等)下で直上水中の栄養塩濃度の経時変化を測定して溶出速度を測定する方法である。本法は比較的容易に実施できるため最も広く使われている。実験装置を図-2に示す。本実験で使用するコアは、直径20cm、高さ50cmの円柱形のコアを使用した。

室内実験の条件は、表-7に示すように3地点ともにそれぞれ嫌気条件、好気条件で行い、水温は図-2に示すような恒温水槽で3地点ともに夏期の平均水温である20℃に調整した。水温とDOは、採水時に多項目水質計で測定して管理した。嫌気状態は、直上水に窒素ガスを与え続けることでDOを貧酸素状態である2mg/L以下の状態とした。好気条件はエアレーションを与え続けることで、水中に酸素が十分ある状態であるDOが6mg/L以上とした。直上水は、ガスを与え続けることで、攪拌した。エアーストーンの位置は、直上水が減少しても水中にあること、底泥を巻き上げないことを考慮して、底泥から7cm上の位置とした。エア量は嫌気条件、好気条件ともに13.5ml/secとした。なお本研究では、泥の状態は水質と異なり、年間を通じて変化が少ないことを前提として、水温を20℃に固定している。

図-2での泥の直上水は、採泥地点の下層の海水をポンプでくみあげたものをフィルター(1μm)でろ過し、水温とDO濃度を調整したものを使用した。底質試料は、採

取した柱状泥の直上水をサイフォンで除去した後、アクリルパイプ下部から底泥を抜き取り、実験装置の中に泥厚が25cmとなるように設定した。

また、底泥表面にいる底生生物(貝、甲殻類等)はピンセットを使用して可能な限り排除した。このようなものが存在すると、底生生物が栄養塩を取り込んだり排出したりする。また、死滅した時はアンモニア態窒素が異常に増加する。本実験で確認されたものは、貝、小さいエビ、ハゼ、プランクトンなどである。

直上水は底質が巻き上がらないように加え、水位を20cm以上にした。毎回300mL程度を底泥から5cmの位置からサイフォンでくみあげて採水した。

(2) 実験結果及び考察

図-3から図-8にそれぞれ亜硝酸態窒素、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全窒素、リン酸態リン、全リンの溶出量の結果を示す。溶出量とは、それぞれの項目で求めた濃度に直上水の容積を乗じたものである。採水量が多いために直上水の容積が減少するので、溶出量とすることで採水量による影響を除いた。

図-3から図-8より、嫌気状態ではアンモニア態窒素、全窒素、全リンが時間とともに増加し、好気状態では、硝酸態窒素と全窒素が減少傾向を示し、全リンはそれほど大きな変化は見られなかった。なお、好気状態でのst.3の2時間目と4時間目の全リンの急激な上昇は、採水した試料が濁っていたことから、底泥を巻き上げたことによる濁りの影響により値が大きくなったと思われる。

アンモニア態窒素、全窒素、リン酸態リン、全リンの溶出量は、72時間目には全ての嫌気状態で覆砂をしてい

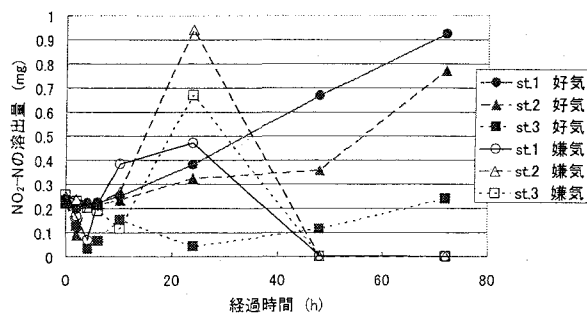


図-3 亜硝酸態窒素の溶出量

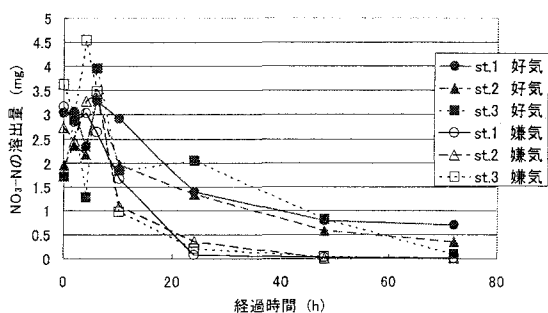


図-4 硝酸態窒素の溶出量

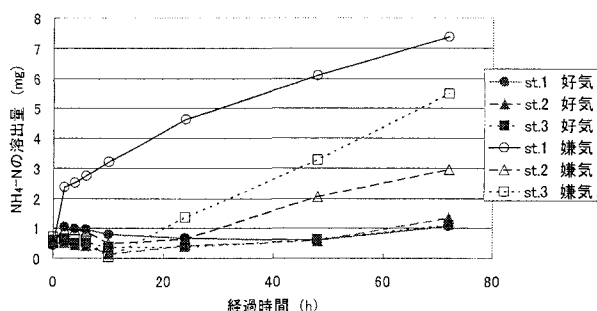


図-5 アンモニア態窒素の溶出量

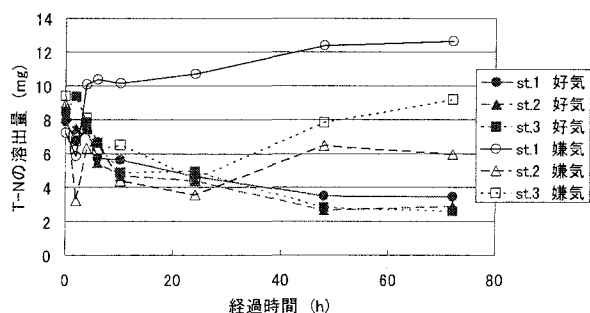


図-6 全窒素の溶出量

ないst.1, 5cm程度ヘドロが堆積しているst.3, 1cm程度ヘドロが堆積しなかったst.2の順番に高い値を示した。この結果は、ヘドロの堆積状態に比例している。つまり、ヘドロの堆積厚が厚いほど溶出量が多い結果となった。

全体の傾向として、10時間前後で状態が変化している。24時間目から全体的に貝などの物質が確認されるようになった。このことから、10時間目以降でそれぞれのコア内の状態が変化したと考えられる。

図-3において、24時間目に嫌気状態の亜硝酸態窒素の値が急激上昇しているのは、図-4の硝酸態窒素の値が10時間目から下がっていることから、硝酸態窒素が還元されて亜硝酸態窒素となった影響があると考えられる。図-4において、硝酸態窒素の値が10時間目以降に全体的に減少する傾向となったのは、堆積物にとりこまれたことによると考えられる。図-5のアンモニア態窒素の値が10時間目以降に上昇したのは、堆積物に取り込まれた硝酸態窒素が還元されてアンモニア態窒素として溶出したことや底生生物による放出の影響だと考えられる。また、どの程度かは不明だが亜硝酸態窒素と硝酸態窒素に関しては脱窒反応による窒素の系外への除去も生じていると考えられる。図-6より、全窒素の好気状態の値が時間とともに減少しているのは、堆積物に取り込まれたことによると考えられる。硝酸態窒素の値が全体的に減少していることから、硝酸態窒素として堆積物に取り込まれたことから全窒素が減少したことも考えられる。

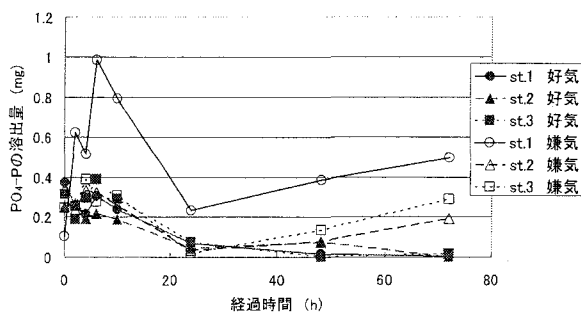


図-7 リン酸態リンの溶出量

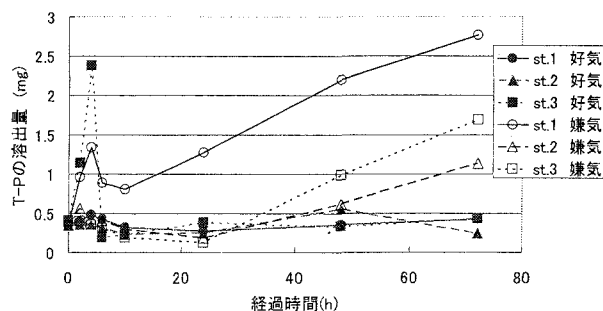


図-8 全リンの溶出量

図-7において、リン酸態リンの値が10時間目以前に比べて10時間目以降の値の方が低くなったのは、10時間目までは溶出していたが、10時間目以降は堆積物に取り込まれたことにより減少したためと考えられる。図-8において、全リンのst.3の好気状態の2時間目と4時間目の値が大きいのは、泥の巻き上げによる影響であると考

えられる。嫌気状態の溶出量は増加しているが、好気状態の溶出量が変わらないのは、溶出していないことも考えられるが、堆積物による取り込みの影響もあると考えられる。

(3) 溶出速度

図-3から図-8の栄養塩のそれぞれ溶出量の結果から溶出速度を求めた。窒素の溶出速度を表-8に示し、リンの溶出速度を表-9に示す。なお、全リンの好気のst.3の2時間目と4時間目の急激に溶出量が多くなったところは、溶出速度を求める際、除外した。

溶出速度は、嫌気状態で、アンモニア態窒素、全窒素、全リンが増加傾向を示し、それぞれst.1, st.3, st.2の順番に溶出速度が高かった。このことは、溶出量で既に述べたが、底泥表面上にあるヘドロの量に比例した結果となった。リン酸態リンにおいては、溶出速度が負の値となり、嫌気状態でも好気状態でも減少傾向を示した。溶出速度が負の値となった原因としては、底泥に取り込まれたことが考えられる。しかし、図-18より、72時間目では増加傾向を示している。

表-8 窒素の溶出速度

	NO ₂ -N (mg/m ² /day)	NO ₃ -N (mg/m ² /day)	NH ₄ -N (mg/m ² /day)	T-N (mg/m ² /day)
st.1 好気	7.80	-28.4	0.841	-43.6
st.2 好気	5.58	-24.6	8.10	-53.2
st.3 好気	0.84	-24.9	4.97	-65.2
st.1 嫌気	-2.52	-36.1	62.2	52.9
st.2 嫌気	-2.83	-34.9	23.3	-0.535
st.3 嫌気	-2.45	-42.6	52.5	12.8

表-9 リンの溶出速度

	PO ₄ -P (mg/m ² /day)	T-P (mg/m ² /day)
st.1 好気	-3.59	-0.0764
st.2 好気	-2.68	0.229
st.3 好気	-3.67	1.30
st.1 嫌気	-1.38	21.9
st.2 嫌気	-1.99	6.65
st.3 嫌気	-0.841	13.7

図-3から図-8より、10時間目以前と以降ではそれぞれ異なった傾向を示している。これは、コア内の状態が10時間目を境として変化したことが考えられる。

図-7より、リン酸態リンの溶出量は、10時間目の前後で大きく異なっている。そこで、リン酸態リンのみ10時間目の前後でわけて溶出速度をもとめた。リン酸態リンの10時間目でわけた溶出速度を表-10に示す。

表-10よりリン酸態リンの溶出速度は、10時間目より前では、アンモニア態窒素、全窒素、全リンの溶出速度と同じく、嫌気状態のst.1が最も高い値となり、次いでst.3が高い値となった。10時間目より後では、図-7より溶出量の傾向では嫌気状態で増加し、好気状態で減少する一般的な傾向と一致するが、溶出速度の値が嫌気状態のst.3がもっとも高く、次いで嫌気状態のst.1が高かった。

表-10 リン酸態リンの10時間目以前と以後の溶出速度

溶出速度 (mg/m ² /day)	全体	10時間以前	10時間以後
st.1 好気	-3.59	-6.80	-1.07
st.2 好気	-2.68	-5.50	-0.688
st.3 好気	-3.67	4.05	-0.994
st.1 嫌気	-1.38	50.0	4.28
st.2 嫌気	-1.99	-3.06	-1.99
st.3 嫌気	-0.841	4.28	4.36

st.1は、溶出量は最も高かったにもかかわらず、溶出速度では嫌気状態のst.3より低い値となった。これは、10時間目のあとの初期溶出量の大きさの違いが原因であると思われる。よって、10時間目より後の溶出速度は、溶出速度として考慮することは若干問題があると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に述べる。

底質は、st.1は冬期、夏期ともに観測結果と分析結果が同じような状態であった。st.2, st.3は夏期よりも冬期の方のヘドロが極端に減少していた。特にst.2のヘドロの減少が大きかった。

溶出実験を行ったことにより、アンモニア態窒素、全窒素、リン酸態リン、全リンの溶出量は72時間目には全て嫌気状態のst.1, st.3, st.2の順番に高い値を示した。この結果は、ヘドロの堆積状態に比例している。つまり、ヘドロが堆積するほど溶出量が多くなった。

溶出速度に関しても、リン酸態リン以外は同様に嫌気状態のst.1, st.3, st.2の順番に高い値を示した。リン酸態リンは、10時間目以前のデータで溶出速度を求めれば、嫌気状態のst.1が最も高い溶出速度で、次いで嫌気状態のst.3の溶出速度が高かった。

以上より、覆砂をされていないところの嫌気状態の泥は、覆砂を行った場所と比べてアンモニア態窒素、全窒素、リン酸態リン、全リンに関しては、明らかに溶出量が多い結果となった。溶出速度においても同様な結果が得られた。また、ヘドロの堆積状況に比例して栄養塩が溶出したことが確認された。

このことから、平成6年の覆砂実施(st.2)から採泥時の平成16年まで、10年程度経過しているにもかかわらず、栄養塩の溶出を削減しているので、本実験では覆砂の効果はまだ持続していると考えられる。しかし、その効果は覆砂上のヘドロの堆積によって減少していると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局横浜技術調査事務所 (2004) : 人工浅場の海域改善効果検討調査 中間報告書
- 2) 運輸省港湾局 研究協議会(1985) : 底質浄化技術の開発ワーキンググループ報告書