

覆砂の栄養塩溶出削減効果の持続性に及ぼす 浮泥の影響に関する現地調査

Field Experiments on the Lasting of Sand Capping Technique on Nutrient Release Reduction and the Influence of Suspended Sediments on the Effects

小川大介¹・村上和男²・片倉徳男³

Disuke OGAWA, Kazuo MURAKAMI and Norio KATAKURA

Nutrients are released from the contaminated sediments on the sea bottom. In order to improve the sediment quality, sand capping techniques were utilized at several coastal seas. However, the technique is worry about the effectiveness due to newly deposited sediments on sea bottom. This paper describes the lasting of sand capping techniques on nutrient release reduction from contaminated sediments by field experiments at MM21 district in Yokohama Port. From the study, it is found that the lasting of sand capping techniques on nutrient release reduction is still remained. But the effect of sand capping technique is decreasing due to newly deposited contaminated sediments on clean sand capping sands.

1. はじめに

東京湾のように高度に富栄養化された閉鎖性の内湾域では、外部からの負荷を大幅に削減したことにより、かなりの水質改善が見られる。しかしながら、依然として、夏期の水質悪化時には、赤潮や青潮の発生が頻発して見られる。この原因の一つとして、過去に海底に堆積した汚染された底泥からの栄養塩の溶出が負荷源となっていることが上げられる。この対策の一つとして、各地で覆砂による底質改善工法が採られている。横浜港MM21地区においても、平成6年～10年にかけてシーブルー事業の一環として、覆砂工事が実施されている。きれいな砂での覆砂による溶出削減効果は、室内実験等で確認されており(堀江ら1996)、かなりの削減が期待される。しかしながら、覆砂の砂の上に、新たに堆積した浮泥がある場合、覆砂による溶出削減効果は薄まり、最終的にはほとんど効果が無くなることが予想される。

以上の観点から、覆砂による栄養塩溶出削減効果の持続性とそれらが周辺の水質に及ぼす影響を、現地調査および室内実験等を用いて行った。

2. 現地調査

横浜港MM21地区において、平成6年～10年にかけて覆砂工事が実施された。その領域を図-1に示す。図中のSt.1～St.5は、水質・底質調査、および底泥採取を実施した測定点の位置を示す。St.1はMM21地区の外側で覆砂を実施していない海域、St.4も覆砂を実施していない

海域で大岡川の河口、St.2は平成6年に覆砂が実施された海域、St.3は平成10年に、St.5は平成7年に実施されている。したがって、これらの覆砂域は覆砂実施後10年～14年経過していることになる。

表-1に現地調査の実施項目の内容を示す。同様の調査を平成18年～20年にかけて、3年間実施した。採水は表層と底層で北原式採水器により、また底泥の直上水はポンプによる汲み上げにより行った。水質調査はクロロテ

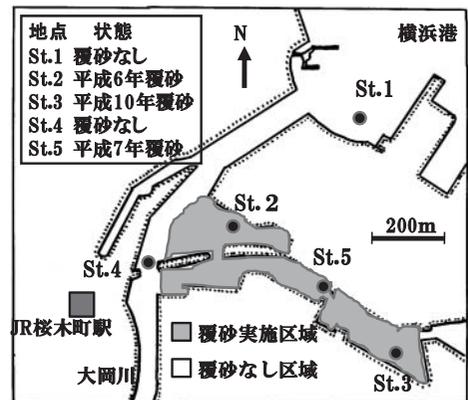


図-1 MM21地区の覆砂範囲と測定点

表-1 現地調査の調査項目 (○: 3カ年実施, △: H18年, H20年のみ実施した項目)

調査項目	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5
採水 (表層, 底層, 直上)	○	○	○	○	○
水質測定 (クロロテック)	○	○	○	○	○
酸素消費試験 (現場, 室内)	○	○	○		
底質調査 (エクマン採泥)	○	○	○		
不攪乱採泥 (観察, 溶出)	○	○	△		
セジメントトラップ		○	○	○	○

1 学生会員 修 (工) 元武蔵工業大学大学院工学研究科
2 フェロー 博 (工) 東京都市大学教授工学部都市工学科
3 正会員 大成建設㈱技術センター

ックによる水温, 塩分, 濁度, DO, クロロフィルaの測定を行った. 酸素消費実験は, 現場では海水中の上・中・底層で, また室内では採取した底泥による酸素消費実験を行った. エクマンによる採泥は底質調査を, また不攪乱採泥は, 現場での観察と溶出試験のためのものである. なお, セジメントトラップは, 海底付近に約1週間設置したボトルに集積した浮泥の回収を行った.

3. 現地観測結果

MM21地区での水質, 底質の現地観測を平成18年8月28日, 19年12月20日, および20年8月4日の合計3回実施した. 以下に, その測定結果例を示す.

(1) 水質調査結果 水質調査結果

表-2に示すのは, 平成20年度に実施された水質の調査結果である. 代表的なものとして, St.1~St.3の水温, 塩分, DO(溶存酸素)の結果を示す. 調査対象区域の水質の状況として, この結果から, 夏期の温度躍層, 密度躍層, および底層水の貧酸素化の様子が読み取れる.

(2) 底質調査結果

底質調査として, エクマンバージによる表層泥の採取, 潜水夫による不攪乱柱状採泥を実施した. 不攪乱の底泥採取は, 現場での底泥の観察のための内径10cm, 長さ1.0mの亚克力パイプによる採泥と, 栄養塩溶出試験のための内径20cm, 長さ50cmの亚克力パイプによる採泥を行った.

図-2に, 柱状採泥の観察結果の一例を示す. この結果は, 平成20年に実施されたものである. 左からSt.1(覆砂無し), St.2(14年経過), St.3(10年経過)の底泥の観察写真である. St.1の場合は, 全体的に黒い色をしており, シルトが還元状態で堆積している様子がわかる. これに対して, St.2およびSt.3の場合は, 表層10cm~15cm

に黒いシルト状のものがあるが, それより下層は黄色い砂が存在し, 覆砂の砂がそのままの状態で見ることが分かる. また, 表層の底泥に関しても, ふわふわした浮泥の状態で見られるのは3cm~5cm程度であり, その下は, 色は黒いが, 比較的硬い土層で, 以前に堆積した浮泥と覆砂材の砂が混合したものと思われる.

これらの底泥の底質を調べたものを表-3に示す. この底質資料は, エクマンバージにより採取した底泥である. 覆砂を実施していないSt.1では底質COD, 強熱減量, 含水比等から, かなり汚染されている底泥であることがわかる. しかし, 覆砂実施海域でのSt.2, St.3の底質は, 含水比が50%程度, 強熱減量も2.2~3.1%で, かなり良い底質を維持していることがわかる. また, 平成17年度に実施された大岡川の河川部分での底質はかなり汚染されている, St.1の底質にはほぼ等しい, このことから, かなり汚染された底泥が大岡川から供給されている可能性がこの結果から推定される.

(3) セジメントトラップ調査

覆砂による底質改善の効果は, 覆砂上に再び堆積する浮泥によって失われる懸念が指摘されている. ここでは,

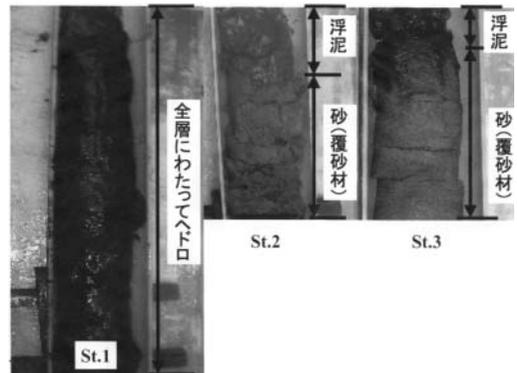


図-2 不攪乱採泥の観察結果 (平成20年8月4日)

表-2 調査海域の水質 (平成20年8月4日)

	St. 1			St. 2			St. 3		
水深	11.4 m			3.5m			3.2m		
透明度	1.4m			1.8m			1.4m		
項目	水温	塩分	DO	水温	塩分	DO	水温	塩分	DO
(m)	(°C)	psu	mg/L	(°C)	psu	mg/L	(°C)	psu	mg/L
0.0	26.9	27.9	6.3	26.9	27.9	5.6	27.2	27.9	8.3
0.5	27.0	27.9	6.8	26.8	27.9	6.3	26.6	28.3	7.7
1.0	26.8	28.0	7.0	26.8	27.9	6.2	25.8	28.9	6.4
1.5	26.3	28.6	6.0	26.5	28.3	6.2	25.9	28.8	4.9
2.0	25.7	28.8	5.5	25.8	28.7	5.6	25.7	28.9	4.1
3.0	25.1	29.3	4.1	24.6	29.6	1.8	24.9	29.4	3.1
4.0	24.8	29.6	3.2						
5.0	23.9	30.0	2.1						
6.0	22.5	30.7	0.9						
7.0	21.9	31.1	0.4						
8.0	21.5	31.3	0.2						
9.0	21.2	31.4	0.2						
10.0	20.8	31.8	0.1						
11.0	20.0	32.2	0.1						

表-3 底質調査結果 (大岡川の底質調査は平成17年度)

分析項目	単位	St. 1	St. 2	St. 3	河口	大岡川
pH	—	8	8.1	8.3	—	—
COD	mg/g乾泥	27.3	6.1	5.5	34.2	53.6
硫化物	mg/g乾泥	2.1	0.53	0.37	6.27	6.99
強熱減量	%	9.6	3.1	2.2	12.3	16
密度(比重)	—	2.6	2.7	2.7	—	—
粒度組成	2mm以上	礫(%)	0	1	2	0
	2.0~0.075mm	砂(%)	10	77	85	16
	0.075~0.005mm	シルト(%)	36	8	4	53
	0.005mm以下	粘土(%)	54	14	9	29
含水比	%	289	56.4	44.7	238	291
全窒素	mg/g乾泥	3.35	0.95	0.9	3.81	4.97
全リン	mg/g乾泥	0.77	0.35	0.24	0.98	1.33
酸化還元電位	mv	-204	-145	-133	-171	-204
全窒素(固液比3%)	mg/L	2.84	1.75	1.34	—	—
全リン(固液比3%)	mg/L	0.144	0.145	0.15	—	—

覆砂の底質改善効果の持続性を検討する目的で、覆砂上にどの程度浮泥が堆積するのかをセジメントトラップを設置することにより算定した。図-3にセジメントトラップに用いたポリ容器を示す。この容器の蓋を開けた状態で、海底近傍に1週間設置し、このポリ容器に堆積した浮泥の重量、底質分析等を行った。堆積物の乾燥重量を表-4に示す。大岡川の河口に近いSt.4、St.2で比較的大きく、奥まったSt.3で小さい値となっている。この結果は、大岡川からの浮泥の流入の関係や、東京湾からの波の侵入による海水の擾乱の影響によるものと思われる。

4. 溶出試験, 酸素消費実験, C/N比の算定

(1) 栄養塩溶出試験

覆砂による水質浄化工法の目的は、汚染された底泥上にクリーンな砂で覆って、底泥からの栄養塩の溶出を削減することにある。覆砂による溶出削減効果は、室内実験等によって既に確かめられている。しかし、覆砂工事後十数年経過した場合、その効果は持続しているのが懸念される。その持続性の検討のために、海底から不攪の採泥を行い、その底泥を用いて、室内での栄養塩の溶出実験を行った。溶出試験の結果に関しては、既に報告している(小泉, 2006, 小川ら, 2008)。図-4, 図-5に示すのは、溶出実験結果の一例である。無機栄養塩としてのアンモニア態窒素とリン酸態リンの溶出試験結果である。この図から、嫌気性の時の溶出速度が大きいこと、および、覆砂無しの場合の溶出速度が大きいことがわかる。これから、覆砂の効果は、依然として持続して

いる様子が分かる。

(2) 酸素消費実験

海底に堆積した底泥の水質に及ぼす影響の一つとして、水中に溶けている酸素を消費することにより、貧酸素水塊形成の原因となることが考えられる。そこで、貧酸素水塊の形成に関与する水中の有機物と底質の有機物の関与を調べる目的で、現場海域の水中および底質、さらに実験室での酸素消費実験を実施した。図-6に示すのが、現場海域での水中および海底での酸素消費実験の概要である。アクリルコアと塩ビコアにより明瓶, 暗瓶状態を作り、明瓶において光合成と分解の両作用, 暗瓶において分解のみの作用から、水塊および底質による酸素消費量の算定を実施した。その結果を水中に関しては表-5に、底質に関しては表-6に示す。これらの結果から、水中では明瓶の場合はDOが増加, 暗瓶の場合はDOが減少している。これは、明瓶の場合は光合成により酸素が生成されていることを示している。これに対して、海底に設置したものは、明瓶, 暗瓶ともにDOが減少しており、底泥による酸素消費がみられる。これらの結果から、酸素消費速度の値を見ると、DOの初期値にも依存するが、海水中の底層で0.08~0.13mg/L/hの消費速度に対して、海底のDO濃度の減少速度が0.39~1.00mg/m²/hとかなり大きいことから、底層における溶存酸素濃度の減少には、底泥の影響が大きいものと思われる。なお、St.1の海底での酸素消費実験は、機械の設置に失敗し、欠測となってしまった。底泥による酸素消費速度の実験として、採取した底泥を用いた実験室での酸素消費実験も実施している。室内実験に使用した底泥は平成19年12月に採取したものである。アクリルコア(φ=10cm, L=19.5cm)に泥を約3cm敷き、その上に、DO濃度を調節した海水を静かに流し込み、ゴム栓で密閉することで、外部からの酸素流入を防いだ方法で実施し、直上水のDO濃度の変化を測定した。1地点につき6本の試料を用意し、1時間おきに1本ずつ、6時間後までDO濃度を測定した。なお、底泥のみによる酸素消費量を求めるため、海水だけの試験体(コントロール試験体)を1地点につき6本用意し、通常試験体と同様の方法でDO濃度を測定した。



図-3 セジメントトラップ

表-4 セジメントトラップの結果 (g乾泥/7日)

測点	H18/8	H19/12	H20/8
	単位 (g乾泥/1週間)		
St. 2	55.25	16.30	25.19
St. 3	16.30	12.16	18.67
St. 4	*	21.41	28.49
St. 5	*	14.13	27.83

(St. 1は海上保安庁が不許可)

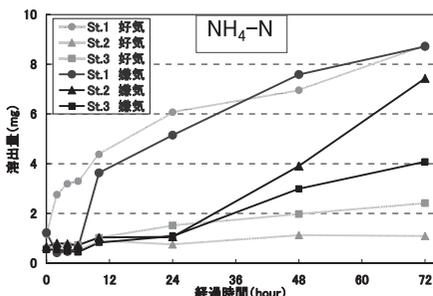


図-4 溶出試験結果 (NH₄-Nの溶出量)

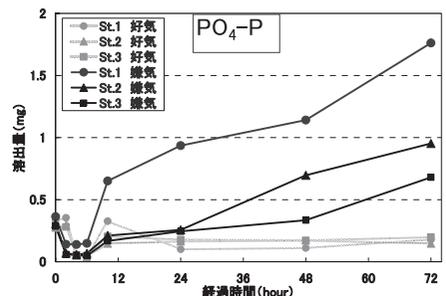


図-5 溶出試験結果 (PO₄-Pの溶出量)

その結果を表-7に示す。この結果は、現場海域での同種の実験とは実験条件も異なり、酸素消費速度は表-6の結果に比べて小さいが、底質の最も汚染されているSt.1での酸素消費速度が最も大きい値を示しており、底質汚染が貧酸素水塊の形成の一因であることを示している。

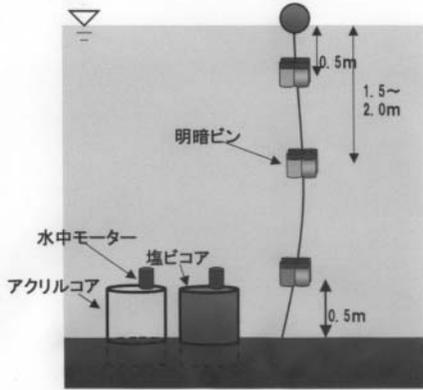


図-6 現場海域での酸素消費試験

表-5 酸素消費実験 (海水中のDO変化)

試験時間	(始) (終)		(始) (終)		(始) (終)	酸素消費速度				
	DO (mg/L)		DO (mg/L)			mg/L/h				
	h	表層	中層	底層	表層	中層	底層	表層	中層	底層
St.1暗明	3.77	6.26	6.33	5.43	4.78	0.97	0.61	-0.02	0.17	0.10
			10.50	6.62	6.62	1.15	-1.12	-0.32	-0.05	
St.2暗明	3.87	8.25	6.86	5.77	5.16	1.62	1.11	0.36	0.16	0.13
			11.84	8.43	8.43	1.49	-0.93	-0.69	0.04	
St.3暗明	3.48	8.53	7.86	6.04	5.55	3.42	3.13	0.19	0.14	0.08
			13.36	7.75	7.75	3.78	-1.39	-0.49	-0.10	

表-6 酸素消費実験 (海底：底泥のDO消費)

試験時間	DO(始)	DO(終)	水の体積	DO増減	コアの面積	酸素消費速度	
	mg/L	mg/L					L
St.1暗明							
St.2暗明	3.02	1.62	0.44	1.42	1.68	94.99	58.63
			0.33	1.42	1.84	94.99	64.21
St.3暗明	3.28	3.42	0.14	1.42	4.67	94.99	149.74
			1.20	1.42	3.16	94.99	101.33

表-7 酸素消費実験 (室内：底泥ありと海水のみ)

経過時間	St.1	St.2	St.3	St.1	St.2	St.3
	mg/L(底泥)			mg/L(コントロール)		
0h	8.6	8.7	8.8	8.6	8.7	8.8
1h	8.1	8.2	8.5	8.5	8.6	8.8
2h	7.8	8.2	8.3	8.5	8.8	8.7
3h	7.5	8.0	8.1	8.5	8.6	8.7
4h	7.2	8.0	8.0	8.4	8.6	8.7
5h	6.9	8.0	7.8	8.4	8.6	8.6
6h	6.7	7.2	7.2	8.1	8.4	8.4
酸素消費速度	29.7	18.9	17.8			
		mg/m ² /h				

(3) C/N比の算定

浮泥や底泥の有機物の分解過程を把握するために、これらに含まれる物質のC/N比を測定した。C/N比とは、炭素と窒素の割合を示すもので、新生堆積物や海水の懸濁物のC/N比はほぼ6前後の値を示すとされている。一般に窒素は易分解の有機物質に多く存在し、この有機物が分解されるとC/N比が大きくなることが知られている。したがって、懸濁物や底泥の有機物の分解程度を示す指標となる。表-8に示すのが、セジメントトラップで捕集された浮泥の底質とC/N比の結果である。含水比194~283%, 強熱減量12.6~15.0%とかなり有機物が多く、C/N比は8.2~10.3であった。この値は、浮泥のような懸濁物が沈降する際に、分解されていることを示している。

次に、表-9に示すのは、不攪乱採泥した底泥をいくつかの層に分けて採取し、分析したものである。表層泥で9.4~11.3、深くなると増加して、5cm以深の底泥では10.0~13.9とC/N比は、僅かではあるが増加している。これは、浮泥が海底に堆積するにつれて、浮泥に含まれている有機物の窒素成分が分解されたものと解釈される。

このように有機物が分解されることは、言い換えれば水中の溶存酸素を消費していることに他ならない。

5. 海底に堆積する浮泥の覆砂効果の持続性

これまでに、セジメントトラップによる浮泥の捕集、および海底に堆積した底泥の底質、さらに覆砂実施海域と覆砂を実施していない海域の底質の栄養塩の溶出実験の結果を述べた。ここでは、それらの結果から、現時点から10~14年前に実施された覆砂の栄養塩溶出削減効果(底質改善効果)の持続性と、この持続性に及ぼす浮

表-8 セジメントトラップの底質とC/N比

測点	水深(m)	含水比(%)	I.L.(%)	T-N(mg/g)	T-C(mg/g)	C/N
St.2	3.7	225.3	12.6	3.8	34.7	9.1
St.3	3.2	283.2	14.6	5.8	48.0	8.2
St.4	3.6	194.3	14.1	5.0	51.2	10.3
St.5	3.1	229.7	15.0	5.5	51.7	9.5

表-9 海底に堆積した底泥の底質とC/N比

測点	深度(cm)	含水比(%)	I.L.(%)	T-N(mg/g)	T-C(mg/g)	C/N
St. 1	0.0-1.0	409	11.2	3.4	31.6	9.4
	1.0-5.0	437	11.6	3.5	32.4	9.3
	5.0-	316	10.5	3.1	31.0	9.9
	最深部	242	9.5	2.4	28.6	12.1
St. 2	0.0-1.0	57	2.0	0.5	5.2	11.3
	1.0-5.0	44	2.2	0.5	5.5	11.1
	5.0-	44	2.2	0.3	4.6	14.1
	最深部	40	2.2	0.3	3.6	13.9
St. 3	0.0-1.0	50	1.9	0.4	4.8	10.7
	5.0-	23	1.1	0.2	2.0	10.4
	最深部	22	0.7	0.03	0.3	10.0

表-10 セジメントトラップによる堆積厚さの推定

観測時	ポリ容器の面積 332.4m ²		底泥の比重 2.65g/cm ³		平成18年8月	
	平成20年8月	平成19年12月	平成19年12月	平成18年8月	平成18年8月	平成18年8月
単位	g	cm/yr.	g	cm/yr.	g	cm/yr.
St. 2	25.19	1.491	16.30	0.965	55.25	3.271
St. 3	18.67	1.105	12.16	0.720	16.30	0.965
St. 4	28.49	1.687	21.41	1.267	*	*
St. 5	27.83	1.648	14.13	0.836	*	*

泥の影響を考察する。

表-4にセジメントトラップ調査により、1週間設置したポリ容器に捕集された浮泥の乾重量を示した。また、表-8にはその底質とC/N比を示した。これらの結果から、まず、どの位の浮泥が海底に堆積するのかの推算を試みた。表-10に、1年間の浮泥堆積厚の算定結果を示す。1年間で0.72～1.69cmとなった（平成18年度のSt.2の結果は非常に大きい値となっているが、この原因は不明である）。一般的に、セジメントトラップによる堆積速度の算定は、過大に見積もられる傾向にある。この原因は、ポリ容器による浮遊泥の採集は、一度海底に堆積したものが波等の作用を受けて再浮遊したもので採集する可能性等があり、過大評価の可能性が大きい。しかし、量的な問題は残るが、覆砂工事海域に再び浮泥が堆積することは避けられないものと考えられる。

覆砂材の砂の上に堆積する浮泥の底質・水質に及ぼす影響を考察する。図-2の結果は、覆砂材の上に堆積した浮泥の様子を示している。この写真によると、底質が変色している部分は10～15cmの厚さで見られるが、浮泥の軟らかい状態は3～4cm程度である。St.2とSt.3の表層泥の含水比、強熱減量の値を見ると、St.1やポリ容器に溜まった浮泥の底質よりかなり小さい値となっている。これは、覆砂材の上に堆積した浮泥の方が、St.1の現地盤の上に堆積したものよりも、より多く分解されたものと判断される。これは、St.2とSt.3の表層泥のC/N比がSt.1の表層泥よりも大きいことから頷ける。また、海水中および海底での現場海域による酸素消費実験から、底泥による酸素消費速度が大きいことが確かめられた。そして、室内の酸素消費試験から、St.1の酸素消費速度がSt.2およびSt.3の酸素消費速度より大きい、すなわち覆砂による底層水の貧酸素化への速度の減少がみられる。

以上の調査結果、および栄養塩の溶出実験結果から、覆砂工事後10～14年経過しているが、覆砂による栄養塩溶出削減効果は、その間の覆砂海域に新たに堆積した新生堆積物によりかなり減少していると思われるが、依然としてその効果は持続しているものと考えられる。

6. 結論

横浜港のMM21地区において、平成6年～10年にかけて

て実施された覆砂による底質改善工法の持続性に関する検討を、現地の水質調査および底質調査、さらに室内実験等を実施して行った。本調査において得られた成果を以下に述べる。

①：底泥の不攪乱採泥により、覆砂材の砂の上に浮泥が堆積していることが確かめられた。しかし、表層泥から10cmほど下層になると、覆砂材の砂が依然として存在している。②：栄養塩の溶出試験より、底泥からの栄養塩の溶出は、嫌気条件において原地盤からの溶出が覆砂地盤からの溶出よりも大きいことが確かめられた。③：セジメントトラップ調査より、覆砂域には原地盤域の底質とほぼ同等の汚染された浮泥が毎年堆積していることがわかった。④：酸素消費試験より、海水中の浮泥および海底に堆積した底泥は、海水の酸素を消費している。底泥による酸素消費速度は覆砂地盤の方が原地盤より小さい。⑤：C/N比の算定結果から、覆砂域に堆積した底泥の有機物はある程度分解されている。⑥：以上のことを総合すると、覆砂工事後十数年経過しているが、依然として覆砂による栄養塩溶出削減効果は持続している。しかし、覆砂上に新たに堆積する浮泥により、その効果が減少しているものと考えられる。

なお、本研究においては、船舶の航行等の現地調査上の制約もあって、覆砂無しの海域がSt.1という覆砂海域よりも深い地点での調査になり、またセジメントトラップ調査も出来ず、覆砂海域との比較に若干の問題点が残った。しかし、溶出実験や、酸素消費実験、C/N比の算定結果から、覆砂による底質改善工法はかなり有効であるものと考えられる。しかしながら、水質が汚染されている限りは、常に覆砂海域に新たに新生堆積物が堆積し、最終的には再び元の汚染された底泥に戻ってしまう。本研究では、覆砂の効果が何年持続性するのかを求めたかったが、残念ながらそこまでの解析には至っていないものの10～14年間は有効であることが示唆された。しかし、覆砂の効果を長く持続させるためには、負荷量の削減等、水質の改善施策も重要な要素である。

最後に、本調査は国土交通省横浜港湾空港技術調査事務所からのデータ提供を受けた。ここに、感謝致します。

参考文献

- 小川大介・村上和男・大宮将司・片倉徳男（2008）：内湾域における底泥の栄養塩溶出および酸素消費に関する現地調査と室内実験，海洋開発論文集，第24巻，pp. 663-668。
 小泉俊昌（2006）：横浜港における底泥からの栄養塩の溶出に関する室内試験と数値計算，武蔵工業大学修士論文，77p。
 堀江 毅・井上聰史・村上和男・細川恭史（1996）：三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験，土木学会論文集，No.53/II-34，pp. 225-235。
 宮岡修二・山本 縁・辻 博和（2001）：閉鎖性水域における新生堆積物の挙動に関する実態調査，大林組技術研究所報，No.63，pp. 91-96。