

リサイクル材を用いた埋立の 周辺生物への安全性確認試験

THE SAFETY EXPERIMENT FOR THE MARINE ORGANISMS OF
RECYCLING MATERIALS FOR RECLAMATION

竹山佳奈¹・中瀬浩太²・鈴木秀男³・玉上和範⁴
瀬川進⁵・野口孝俊⁶

Kana TAKEYAMA, Kota NAKASE, Hideo SUZUKI, Kazunori TAMAUE,
Susumu SEGAWA, Takatoshi NOGUCHI

¹水修 五洋建設株式会社 環境事業部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

²正会員 五洋建設株式会社 環境事業部 (同上)

³東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (〒163-1031 東京都新宿区西新宿3-7-1)

⁴正会員 工修 東亜建設工業株式会社 技術研究開発センター (同上)

⁵水博 東京海洋大学教授 海洋環境学科 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

⁶正会員 国土交通省関東地方整備局 東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-7)

It is necessary to examine safety of recycling materials (cement-stabilized soil, detritus, steel slag and granulated blast furnace slag) which used by Haneda Airport D-runway construction. We examined it about influence on turbid water which inhabited the peripheral sea area. we examined an indoor test (bivalves valve movement patterns test and acute and sub-acute toxicity test) and a site test (rearing experiment). As a result, it was thought that there was little influence that the turbidity which occurred at the time of execution gave to creature which inhabits the peripheral sea area. In addition, it developed that outbreak of the influence to give to a creature every material for reclamation was different. It is thought that the management of turbid water occurring by construction can confirm safety to the peripheral sea area environment we evaluate and execute construction management influence on creature according to materials and by managing the execution.

Key Words : *Recycle material, reclamation, bivalves valve movement patterns test, toxicity test*

1. はじめに

海域における埋立工事で用いられる海砂や山砂は、底質の悪化や貧酸素水塊発生などの環境への副次的影響の他、採掘の進行により良質な砂が少なくなるなど資源の枯渇も懸念されている。そのため、海砂や山砂の代替となる埋立材料としてリサイクル材料の活用が注目されている。リサイクル材料には、建設副産物（浚渫土砂等）や産業副産物（鉄鋼スラグ等）があげられる。羽田空港D滑走路埋立工事では、埋立材料の一部に固化処理土やスラグ材等のリサイクル材料を使用している。リサイクル材料についてはメーカーによる安全性の確認がなされているが、海域での使用について懸念が示される場合もある。

また、工事周辺海域は、多摩川河口域に位置しており、多くの生物が生息している。例えばアサリ浮遊幼生の出現密度は三番瀬や金沢湾周辺海域に匹敵

し、三枚洲～羽田周辺海域のアサリ産卵個体群は、東京湾全体のアサリ幼生の供給に大きく寄与しており¹⁾浅海域は各種魚類等の稚魚期や幼生期の生活領域である可能性が高い²⁾とされている。そのため、事前に周辺海域の生物生息状況や工事による影響予測や、濁りが生物におよぼす影響について、本州四国連絡架橋漁業影響調査報告書、水産用水基準³⁾等の既存資料を参考に濁りの管理基準値（工事区域外縁でバックグラウンド+SS10mg/l）を設定している。しかしながら、既存の濁水影響の報告では懸濁物質としてコンクリートあくや粘土等を濁水材料としているのに対し、工事ではリサイクル材料を使用しており、既存報告の濁水材料とは異なるものである。そこで、実際に工事で使用した埋立材料について、生物に対する影響試験を実施し、周辺海域に生息する生物への安全性の確認をおこなった。

試験は生物に対する生残への影響を把握するため

に用いられる急性（96時間）・亜急性（14日間）毒性試験をおこなった。また、当該海域に分布している水産重要種のアサリについて、濁りに対する生理的な影響を評価するために、殻の開閉運動への影響試験を実施した。さらに、実際の施工場所直近でアサリの飼育試験を実施し、現地で発生する濁水の影響を評価した。なお、殻の開閉運動試験および毒性試験は東京海洋大学海洋環境学科無脊椎動物学研究室の瀬川研究室にて実施した。

2. 試験材料および対象生物

(1) 試験材料

試験材料は実際に工事で使用した埋立材料のうち、固化処理土、岩ズリ、スラグ材2種の計4種類とした。固化処理土（写真-1）は、工事で使用している材料と同様の配合（現地浚渫土1kgに対して高炉B種セメント0.097kg、海水0.318kg）で、試験直前にハンドミキサーで混合して作成した。その他の材料については、現地で使用した埋立材料である西伊豆宇久須産の岩ズリ（写真-2）、新日鐵製鉄鋼スラグ水和固化体製人工石材（以下水和固化体）（写真-3）および高炉水砕スラグ（以下水砕スラグ）（写真-4）を使用した。固化処理土以外の各材料は濁りを発生させるために、粉碎した材料を人工海水（テトラ社製テトラマリンソルトを塩分濃度32.0に調整）に混合した。

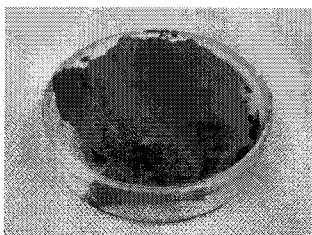


写真-1 固化処理土

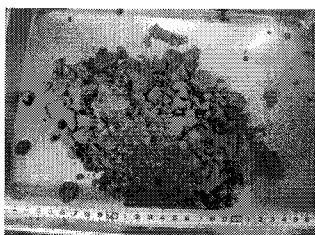


写真-2 岩ズリ

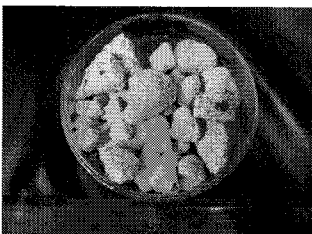


写真-3 スラグ水和固化体

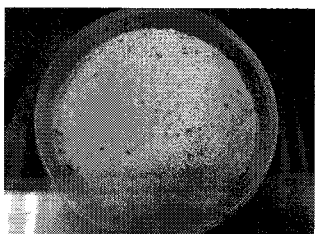


写真-4 水砕スラグ

(2) 対象生物

対象生物は、羽田周辺海域に生息する二枚貝のうち水産重要種のアサリ *Ruditapes philippinarum* を用いた。アサリは環境変化の激しい干潟に生息し、塩分や濁りに対する耐性は比較的強く、SS50mg/L～1000mg/Lの濁水中でも摂餌量に影響を受けないこと、SS300mg/L～500mg/Lで濾水量が低下する等の報告が

ある⁴⁾が、致死濁水濃度については報告がない。

また、東京湾に分布する生物でアサリよりも水質変化に敏感であると考えられるクルマエビ *Penaeus japonicus* およびヒラメ *Paralichthys olivaceus* についても試験を実施した。試験に使用したアサリは東京湾木更津産（市場にて購入；平均殻長27.5mm、平均殻幅19.1mm）、クルマエビは奄美大島産の養殖エビ（（有）さくら水産；平均全長138.8mm、平均湿重量16.3g）、ヒラメは静岡産の種苗生産魚（日清マリンテック（株）；平均体長88.9mm、平均体重4.2g）を用いた。

3. 試験方法

(1) 二枚貝殻体運動影響試験

a) 試験概要

二枚貝は魚類や甲殻類と比較して、移動能力が乏しい。そのため、急激な環境変化に対して影響を強く受ける可能性がある。そのため、致死に至らないまでも、生体に対して何らかの影響をおよぼす濁水レベルを把握しておく必要がある。そこで、毒性試験に先立ち、二枚貝殻体運動影響試験（殻の開閉運動への影響試験）を実施した。

二枚貝は一般に何らかの刺激を外部から受けた場合、殻を閉じたり、活発に開閉運動をおこなう等の防御反応を示す。そのため、開閉運動をモニタリングすることにより、二枚貝の濁水への反応を把握することが可能である。

b) 対象生物および試験ケース

二枚貝殻体運動影響試験はアサリを対象とした。試験ケースは、固化処理土と岩ズリについては計測器の測定限界値の約1000NTUを上限として設定し、水和固化体と水砕スラグについては攪拌によって得られた最大濁度とし、水和固化体70NTU、水砕スラグ80NTUとした。

c) 試験装置

底質材料としてガラスビーズを50mm厚で敷いた30cm水槽を試験水槽とした。試験水槽に隣接して濁水を攪拌した濁水水槽を配置した。試験開始時に、濁水水槽から飼育水槽にペリスタポンプを用いて上限に達するまで連続添加し、飼育水槽内の濁度を上昇させた（図-1）。

二枚貝の開閉運動は殻体運動測定システムSL-7108（以下貝リソナル；株式会社東京測器研究所）を用いて測定した（写真-5）。この装置は二枚貝の左殻と右殻にセンサと磁石を接着し（写真-6）、殻の開閉に伴う磁力の変化を開閉距離として測定する装置である。貝殻にセンサを装着し、6時間以上濁水添加前の平常時の殻体運動を計測した後、濁水水槽から飼育水槽に濁水添加を開始し、開閉運動を測定した。水槽内の濁度およびpHはポータブル多項目水質計WQC-24（東亜DKK株式会社製）で連続測定した。

c) 解析方法

貝リンガルで得られる開閉運動の波形は、平常時にアサリは開殻していることから、開殻状態を基底レベルとし、閉殻から開殻に至る一連の動作をスパイクとして表現している。スパイクの頂点をピークとし、次の開殻状態の基底レベルをバレーとして、その中間値を開閉距離平均値とした（図-2）。平常時および濁水添加中の殻体運動について、開閉運動の波形の比較およびスパイク数と開閉距離平均値の添加前後で95%有意水準の差の検定（Studentのt検定）をおこなった。

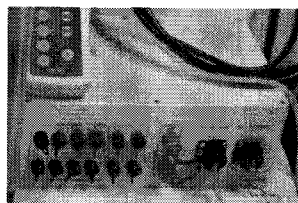


写真-5 貝リンガル

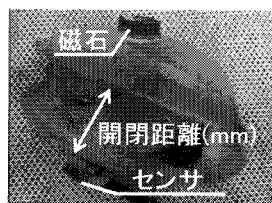


写真-6 センサ取付状況

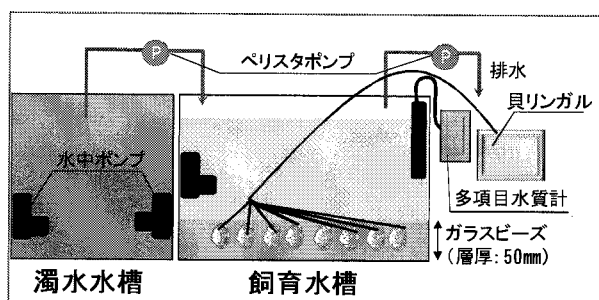


図-1 試験装置

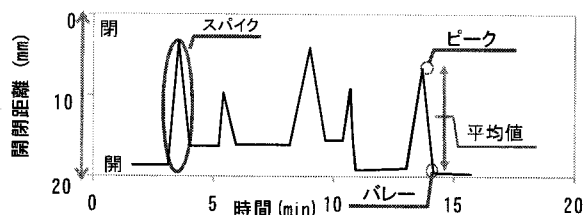


図-2 開閉運動の波形（例）

(2) 毒性試験

a) 試験概要

海産生物に対する化学物質の許容濃度を決定する方法として、急性毒性試験によって求めた半数致死濃度を求める方法がある。また、急性毒性試験よりも長期的な影響を把握するための試験として亜急性毒性試験がある。そこで、埋立材料の生残への影響を把握するため、急性毒性試験（96時間）および亜急性毒性試験（14日間）を実施した。

b) 対象生物および試験ケース

毒性試験はアサリ、クルマエビ、ヒラメ稚魚を対象とした。試験ケースは対照区および各材料の最大発生濃度および測定限界値を上限として設定した（表-1）。試験は20℃に設定した恒温室内で実施し、24時間以上水槽内で馴致をおこなった後に、試験を開始した。

表-1 試験ケース

材料	濁度 (NTU)		
固化処理土	250	500	約1000
岩ズリ	250	500	約1000
水和固化体	35	70	-
水砕スラグ	40	80	-
対照区	0	-	-

c) 試験装置およびモニタリング

底質材料としてガラスビーズを50mm厚で敷いた30cm水槽を試験水槽とした。試験水槽にはエアレーションをおこない、海水は24時間ごとに新しい濁水と入れ替えた。試験中は無給餌とした。生残状況のモニタリングは24時間ごとに実施した。供試体の斃死確認は、アサリは殻が完全に開いた状態で反応がないこと、クルマエビは尾部を抑えても反応のないこと、ヒラメはガラス棒で頭部や眼球を突いても反応がないことで判断した。半数致死濃度は、96時間および14日間の致死率と濁水の濃度との関係をプロットし、致死率が50%となる濁度を読み取り、96時間50%致死濃度および14日間50%致死濃度とした。

(3) 現地試験

a) 試験概要

現地飼育試験は、実際の管中混合固化処理土の打込み時に発生する濁水が生物におよぼす影響を明らかにするための試験である。固化処理土の投入場所直近で試験水槽を設置し、現地海水を掛け流した水槽で生物を飼育し、現地で発生する海水が生物におよぼす影響について把握するための試験を実施した。

b) 対象生物および試験場所

現地試験はアサリを対象とした。試験場所は埋立護岸内の管中混合固化処理土の打込み直近（試験区）および埋立護岸外（対照区）とし、それぞれ作業船上に試験水槽を設置し試験を実施した（図-3）。

c) 試験装置およびモニタリング

底質材料としてガラスビーズを50mm厚で敷いた45cm水槽を試験水槽とした。試験水槽の海水は、各地点の水深下3mの海水をポンプアップして掛け流した。試験は、管中混合固化処理土の打込み期間中12日間実施し、試験中は無給餌とした。モニタリングは24時間ごとのアサリの生残状況の確認および試験区と対照区の水槽の水質（水温、塩分、DO、pH、濁度）を前出のWQC-24を用いて10分間隔で測定した。

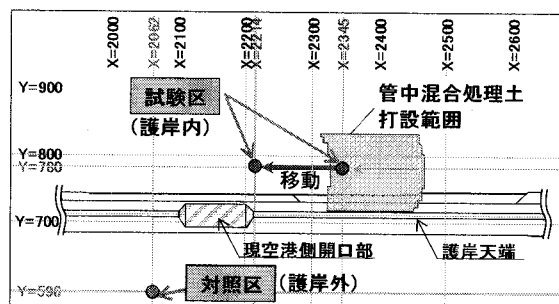


図-3 現地試験実施位置

4. 試験結果

(1) 固化処理土

a) 二枚貝殻体運動試験

時間当たりのスパイク数および開閉距離平均値は、濁水添加前後で8割以上の個体で有意差がみられた。しかしながら、スパイク数は個体によって傾向が異なっており、全く変化しない個体もいた。また、一時的にスパイク数が減少した個体も6時間後には平常時と同様のスパイク数に戻っていた。開閉距離平均値は添加前後で最も差が大きい個体で2mm以下であった。

b) 毒性試験

急性毒性試験の結果、アサリは500NTUまでは対照区と同様の致死率であり、試験終了時に約1000NTUで致死率40%であった。クルマエビは500NTUまでは致死率20%以下で半数致死濃度は700NTU、ヒラメは250NTUで致死率0%であり、半数致死濃度は400NTUであった。

亜急性毒性試験の結果、アサリの半数致死濃度は約1000NTUであったが、濁度500NTUまでの致死率は対照区よりも低かった。クルマエビは5日間後には、250NTUで致死率約20%、500NTUで30%、約1000NTUで90%近い個体が斃死していた。なお、試験終了時に対照区を含め全試験区で50%以上の個体が斃死しており、半数致死濃度は求めることができなかった。ヒラメは急性毒性試験と同様の結果だった（表-2）。

(2) 岩ズリ

a) 二枚貝殻体運動試験

時間当たりのスパイク数および開閉距離平均値は、濁水添加前後で有意差がみられた個体は約3割であった。

b) 毒性試験

毒性試験の結果、どの生物も試験終了時に致死率50%を超えることがなく、最大致死率はクルマエビの500NTU以上（40%致死率）であった。

亜急性毒性試験の結果、アサリおよびヒラメは濁度約1000NTUでも致死率は0%であった。クルマエビは5日後に500NTU以上で約半数が斃死しており、試験終了時に対照区も含めた全試験区で50%以上の個体が斃死した（表-3）。

(3) スラグ水和固化体

a) 二枚貝殻体運動試験

時間当たりのスパイク数および開閉距離平均値は、濁水添加前後で8割以上の個体に有意差があった。スパイク数は、添加前に0回/10分～15回/10分だった個体が、添加後に0回/10分～5回/10分に減少しており、添加により開閉運動数が減少した。また、開閉距離平均値は、添加前後の差が最も大きい個体で

1mm程度であった。

b) 毒性試験

急性毒性試験の結果、アサリは試験終了時に70NTUで致死率27%、対照区で致死率20%であった。クルマエビは試験終了時に35NTUで致死率0%であった。しかしながら、70NTUでは24時間後に致死率60%、試験終了時に致死率80%と高く、半数致死濃度は55NTUであった。なお、ヒラメは試験終了時まで全試験区で全個体生存していた。

亜急性毒性試験の結果、試験終了時のアサリの致死率は対照区で40%、35NTUで70%、70NTUで30%であり、濁度と致死率に一定の関係がみられなかったため、半数致死濃度を求めることができなかった。クルマエビは5日後までは、35NTUの試験区で致死率10%と低かったが、試験終了時には対照区も含めた全試験区で致死率50%以上であり、半数致死濃度は求めることができなかった。なお、ヒラメは試験終了時に全個体生存していた（表-4）。

(4) 水砕スラグ

a) 二枚貝殻体運動試験

スパイク数および開閉距離平均値は、濁水添加前後で約8割の個体に有意差がみられた。スパイク数は個体によって傾向が異なっており、濁水に対する殻体運動の反応に個体差があった。また、開閉距離平均値は添加前後で最も差が大きい個体で2mm以下であった。

b) 毒性試験

急性毒性試験の結果、アサリおよびヒラメは試験終了時に全個体生存していた。クルマエビは試験終了時に40NTUおよび80NTUで致死率20%であった。

亜急性毒性試験の結果、アサリの致死率は試験終了時に80NTUおよび対照区で10%であった。クルマエビは5日後に40NTU以上の試験区で半数近くが斃死し、試験終了時には40NTUで致死率80%、80NTUで致死率60%と高かったが、対照区も56%と半数以上が斃死していたため、半数致死濃度は求めることができなかった。ヒラメは試験終了時に全個体生存していた（表-5）。

(5) 現地試験

アサリの試験終了時の生存状況は、試験区で生存率98%、対照区で93%と両試験区ともに高い生存率であった（図-4）。水槽内の水質測定の結果、打込み直近の試験区では濁度が急激に上昇する（ピーク値をとる）と、pHもピーク値をとるという関連性がみられ、管中混合処理工由来の影響であると考えられた。固化処理土打設直後には濁水は一時的に最大で約800NTUまで上昇することもあったが、20分後には再び20NTU以下に減少しており瞬時的な上昇だった（図-5）。対象区では濁度とpHに関連性はみられず、濁度は20NTU以下、pHも8.5前後だった（図-5）。

表-2 毒性試験結果 (固化処理土)

固化処理土	試験内容	濁度 (NTU)				半数致死濃度 (NTU)	備考
		1	10	100	1000		
アサリ	急性毒性	[全生存]				-	最大濁度で致死率40%
	亜急性毒性	[全生存]				1000	500NTUまで生残の影響なし
クルマエビ	急性毒性	[全生存]				700	-
	亜急性毒性	[全生存]				対照区も半数以上死亡	5日間: 250NTU影響なし
ヒラメ	急性毒性	[全生存]				400	-
	亜急性毒性	[全生存]				400	-

表-3 毒性試験結果 (岩ズリ)

岩ズリ	試験内容	濁度 (NTU)				半数致死濃度 (NTU)	備考
		1	10	100	1000		
アサリ	急性毒性	[全生存]				-	最大濁度で致死率0%
	亜急性毒性	[全生存]				-	最大濁度で致死率0%
クルマエビ	急性毒性	[全生存]				-	500NTUで致死率40%
	亜急性毒性	[全生存]				-	5日間: 250NTU影響なし
ヒラメ	急性毒性	[全生存]				-	最大濁度で致死率0%
	亜急性毒性	[全生存]				-	最大濁度で致死率0%

表-4 毒性試験結果 (水和固化体)

水和固化体	試験内容	濁度 (NTU)				半数致死濃度 (NTU)	備考
		1	10	100	1000		
アサリ	急性毒性	[全生存]				-	-
	亜急性毒性	[全生存]				-	致死率: 70NTU (30%) 対照区 (40%)
クルマエビ	急性毒性	[全生存]				55NTU	70NTU: 24時間後に致死率60%
	亜急性毒性	[全生存]				-	5日間: 35NTU影響なし
ヒラメ	急性毒性	[全生存]				-	全個体生存
	亜急性毒性	[全生存]				-	全個体生存

表-5 毒性試験結果 (水砕スラグ)

水砕スラグ	試験内容	濁度 (NTU)				半数致死濃度 (NTU)	備考
		1	10	100	1000		
アサリ	急性毒性	[全生存]				-	全個体生存
	亜急性毒性	[全生存]				-	80NTU, 対照区: 致死率10%
クルマエビ	急性毒性	[全生存]				-	-
	亜急性毒性	[全生存]				-	5日後に40NTUで致死率40%
ヒラメ	急性毒性	[全生存]				-	全個体生存
	亜急性毒性	[全生存]				-	全個体生存

生残への影響なし
 生残に影響有り
 影響不明 (対照区の致死率50%以上)

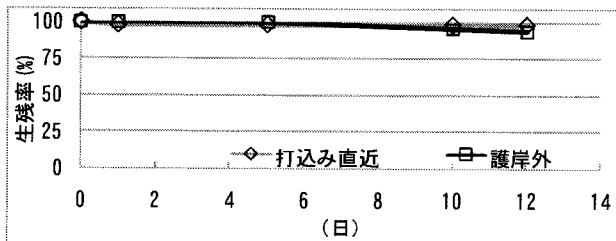


図-4 現地試験結果 (アサリの生残状況)

	測定場所	濁度 (NTU)		
		0	10	20
固化処理土	護岸外	[全生存]	[全生存]	[全生存]
岩ズリ	-	-	-	-
水和固化体	投下場所より200m	[全生存]	[全生存]	[全生存]
水砕スラグ	投下場所より240m	[全生存]	[全生存]	[全生存]

表-6 濁水の現地発生状況 (水質監視報告より)

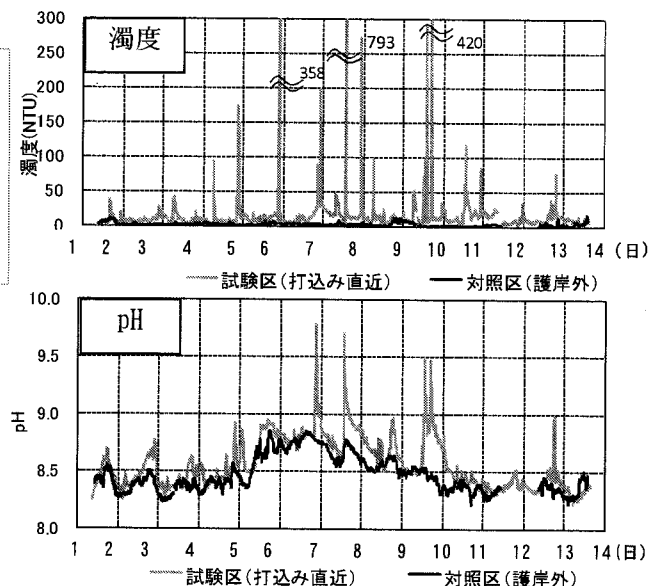


図-5 現地試験水質結果 (上図:濁度, 下図:pH)

5. まとめ

(1) 埋め立て材料ごとの影響

a) 固化処理土

現場海域において、固化処理土の打込み直近では約800NTUの高濃度の濁水が発生しているが、瞬時的な濁度の上昇であった。また、護岸外の濁度は常時20NTU以下であり、管中混合固化処理工による周辺海域への影響は、護岸外までは殆ど及ばないと考えられた(図-5)。一方、生物試験の結果、クルマエビおよびヒラメは24時間以上250NTUを超える濁水継続した場合、生残に影響をおよぼす可能性があった。

以上のように、250NTU以上の濁水が数時間継続して発生した場合、生物に影響をおよぼす可能性がある。しかしながら、攪拌をしないと12時間後には濁度100NTU以下に低下していた。また、現地で発生する濁水レベルは20NTU以下であったことより生物に与えた影響は少なかったと考えられる。

b) 岩ズリ

岩ズリ由来の濁水に対するアサリの殻体運動は約1000NTUの濁水下で平常時と変わらない個体が多いことから、濁水による影響は他の材料よりも小さいと考えられた。毒性試験の結果、最も低い濁度で影響が発生したクルマエビは、250NTU以上の濁水が5日間以上継続した場合、濁水により生残への影響が発生する可能性がある。

以上のことより、250NTU以上の濁水が5日間以上継続した場合、生物に影響をおよぼす可能性がある。なお、岩ズリについては現地で拡散状況は未計測であるが、固化処理土と同様に攪拌をしないと5時間後には濁度100NTU以下に低下していたことから、固化処理土と同様に護岸外への影響は少なかったと考えられる。

c) スラグ水和固化体

現場で実際に発生したスラグ水和固化体由来の濁水は、打込み場所から約70m離れた地点で78.6NTUであり、約200m離れた地点では最大でも13.9NTUであった(表-6)。毒性試験の結果、アサリやヒラメに対する生残への影響は無かった。クルマエビについては、35NTUの濁水が5日間以上継続した場合、生残に影響が発生する可能性がある。

以上のことより、35NTU以上の濁水が5日間以上継続すると生物に影響をおよぼす可能性があるが、現地で発生した濁水は護岸外では13.9NTUよりも低いと考えられることから、生物に与えた影響は少なかったと考えられる。

d) 水砕スラグ

現場で発生した水砕スラグ由来の濁水は、打込み場所から約70m離れた地点で最大20.1NTUであり、130mの地点では最大でも11.5NTUであった(表-6)。毒性試験の結果、アサリやヒラメに対する生残の影

響はなかった。クルマエビについては、80NTUの濁水が5日間以上継続した場合、生残に影響をおよぼす可能性がある。

以上の結果より、35NTU以上の濁水が5日間以上継続した場合、生物に影響をおよぼす可能性があるが、現地で発生する濁水は護岸外では11.5NTUよりも低いと考えられることから、生物に与えた影響は少なかったと考えられる。

(2) 今後の課題

今回の試験の結果、材料によって飽和状態に攪拌した際の濁度が異なっており、同じ濁水でも生物への影響発生状況は異なっていた。固化処理土や岩ズリ由来の濁水は、1000NTU以上の高濃度の濁水が発生した。しかしながら、生物の生残に影響をおよぼす濃度は250NTU以上であり、それ以下の濁度では影響が発生していなかった。一方で、スラグ水和固化体や水砕スラグ由来の濁水は、最大でも100NTU以下しか発生しなかった。しかしながら、35NTU以上の低濃度の濁水でも生物の生残への影響が発生していた。

上記より、材料や対象生物によって濁水による影響発生状況が異なることが予測された。埋立工事で発生する濁水の管理は、濁度による一律管理ではなく、材料や対象生物に合わせて影響を把握し、最も安全側の濁度(濁度が低くても影響が大きい濁水材料の値)で管理する必要があると考えられた。

なお、今回の試験は2週間程度の短期間に渡って濁水が継続した際の、生物への影響を把握することを目的とした。そのため、体内にとりこまれた懸濁物質がおよぼす食物連鎖や再生産への生理的な影響や組織レベルの解剖試験に関する試験は未検討である。濁水が数ヶ月に渡り継続した場合の長期的な生態系への影響については、今後の課題ではあるが、羽田空港D滑走路埋立工事で発生した濁水は、工事区域外では極めて低レベルの濁度であり、高濃度の濁水が数週間以上継続することは観察されていない。また、pHに関しても、すぐに低下していることから、周辺生物に与える影響は少なかったと考えられる。

参考文献

- 1) 粕谷智之、浜口昌巳、古川恵太、日向博文：秋季東京湾におけるアサリ浮遊幼生の出現密度の時空間変動、国土技術政策総合研究所研究報告、第12号、2003。
- 2) 甲原道子、河野博：稚魚ネットで採集された東京湾湾奥部の仔稚魚、*La mer*, No. 39, pp. 121-130, 1999。
- 3) (社)日本水産資源保護協会編：水産用水基準(2005年版)、(社)日本水産資源保護協会、2006。
- 4) (社)日本水産資源保護協会編：環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理、(社)日本水産資源保護協会、p. 431-432, 1983。