（２）貧酸素水塊の発生対策

１）窪地に伴う貧酸素水塊の発生や影響に関する既存知見の整理

窪地に伴う貧酸素水塊の発生や影響に関する既往知見の整理

【目的】

比較的遮蔽された大きな内湾においては、陸域からの栄養塩類の供給に対し、干潟域などにおける分解過程や潮汐に伴う湾内の海水と外海水との交換によって生態系のバランスが保たれてきた。しかし、そのような海域では干潟域のようなごく浅い海辺は産業活動の発達に伴い埋め立てられる傾向にあったため、本来持っていた分解過程は大きく損なわれてきた。また都市部近郊の浅海域では大規模な海底土砂の採取が行われ、埋め立てに使用される用材として、または安価な土砂の供給源として利用されてきた。これらの環境改変は内湾域の分解機能の損失、および海洋生物にとって致死的に作用する貧酸素水塊の発生という形で、二重に内湾域生態系の存続を脅かす結果となった。本稿では貧酸素水塊の発生の過程についての知見を整理すると共に、本事業の観点から生物への生活史を通じての影響を考察することを目的とした。

【貧酸素水塊の発生源】

主に都市部に近接した浅海域においては、高度経済成長期に海底土砂の大規模な採取によって大きな窪地が生じ、これが貧酸素水塊の発生につながっている。採取された土砂は、陸地に近い干潟域などのごく浅い沿岸を埋め立てるための浚渫土として、また鉄筋コンクリート需要の急増に伴った山砂利や川砂利の代替品として使用された。このような窪地では海水が停滞することにより、好気的な生物活動が妨げられ嫌気的な過程が卓越しやすい。その結果として貧酸素水塊や硫黄酸化物を多く含んだ青潮（苦潮）が発生しやすくなった。これらの水塊が浅瀬など周辺の生息場所に到達すると、そこに生息する生物群集に重大な影響を与えうる。

これらの貧酸素水塊の発生に関与する浚渫跡地は、東京湾奥部、三河湾、大阪湾、瀬戸内海（岡山県、広島県、山口県、徳島県、香川県、愛媛県）、九州沿岸で確認されている（宗方 1991; 国交省 2003; 内藤ほか 2006; 中村 2006）。このように浚渫跡地は国内に広く分布しているが、とくに西日本に多い。この経緯としては地理学的な原因があり、西日本では東日本と比べて山砂利や川砂利の生産量が少ないことが挙げられる。また、西日本ではそれらの砂利の採取が河川管理上厳しく制限されているため、当時無尽蔵にあると考えられた海砂利が代替的なコンクリート用材として掘削されてきた（宗方 1991）。

これら浚渫土を採取した跡地は大きく分けると、一カ所を深く掘り下げて凹状の窪地を作るタイプと海底の起伏を平坦に均したようなタイプのものとがある。前者は「窪地タイプ」、後者は「平滑化タイプ」のように呼称され区別されている（内藤ほか 2006）。前者の

代表例は東京湾奥部、後者は瀬戸内海である。東京湾奥部では過去、東京湾岸部の埋め立て開発のために大規模な浚渫が行われており、約 1 億 m^3 もの窪地が生じている。周囲の自然海底の水深は約 10 m だが、これに対して急深な窪地が掘削されており、窪地底面では水深約 30 m にも達する（図 1)。一方、後者の平滑化タイプの代表例は瀬戸内海沿岸であり、各県において海砂利が採取されている。採取量は昭和 43 年から平成 11 年度までの合計で約 7.3 億 m^3 に達する（環境省 2002)。

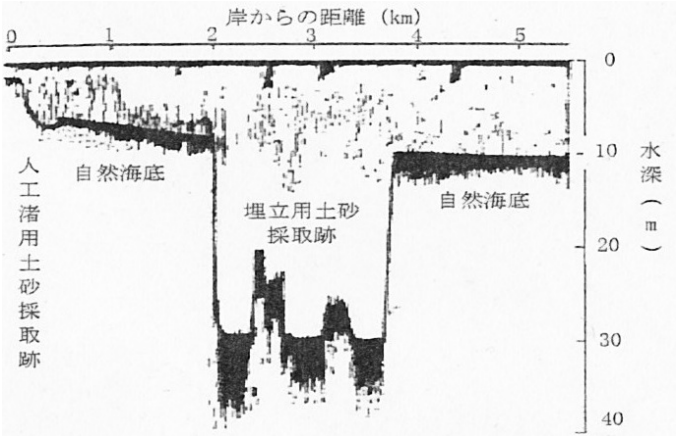

図 1 東京湾の幕張沖に存在する浚渫土採取跡の断面図（沼田・風呂田 1997）

【貧酸素水塊の発生過程】

海底土砂の採取跡が周辺の海域環境に与える影響は、窪地タイプと平滑化タイプとで異なる。貧酸素水塊の発生を引き起こすのは主に窪地タイプであり、平滑化タイプでは必ずしも貧酸素水塊の発生は生じない。流動性を向上させることによる流動的な漁場環境の創成や（環境省 2002)、継続的な海底土砂採取による濁度の増加が周辺環境の生態系に変化を与える等の影響が考えられているが（高橋ほか 2005)、窪地タイプほど明確な影響は見られない。したがって本稿では窪地タイプに焦点を絞って議論していく。

窪地タイプでは、図 1 のような自然海底に対して極端に深く掘り下げられた窪地が海水の流動を妨げており、周辺の海水との交換が起こりにくくなる。また流動による水塊や海底の撹拌も起こらず、海中の懸濁物が沈降しやすくなることで太陽光の透過も大きく減少する。さらにこのような窪地が東京湾や大阪湾、三河湾のように都市部近郊の湾内にある場合には富栄養化による影響を受け、より貧酸素化が起こりやすい条件が成立する。また貧酸素水塊が長期にわたって滞留し続ける場合には、硫化物が生じ青潮（苦潮）発生の原因となる（国環研 1996)。

貧酸素水塊は上記のような海底の人為的改変や栄養塩負荷がない状況下においても、閉

鎖度が非常に高い海域では発生しうる現象であったようだ（柳 1989）。そのような自然発生的と見られる貧酸素水塊は長崎県大村湾などで観察されている（柳 1989）。しかしやはり大半の貧酸素水塊発生は大都市近郊の内湾域で発生しており、大規模な海底土砂採取による窪地の存在と、陸域からの過剰な栄養塩負荷の組み合わせによって生じるのが典型的と考えられる。

貧酸素水塊の代表的な発生から消長の過程は次のようなものである。初夏以降の気温・日射の上昇に伴い水温躍層が生じ、表面海水と底層海水の交換が停滞し始めると、表層では植物プランクトンの光合成により発生した溶存酸素が拡散せずに過飽和となる。一方逆に水温躍層よりも底層へはあらゆる有機物が沈降し堆積しやすくなり、これらの堆積した有機物を分解するために酸素が消費される。これらの過程の結果として底層には貧酸素水塊が形成される。盛夏にはこの傾向は最も顕著となり、気温の低下が始まるまで継続する。秋になり気温の低下により表面海水の温度が下降すると鉛直混合が生じて急速に貧酸素水塊は消滅していく。

貧酸素水塊の発生する場所の特徴は条件的に異なるようである。例えば東京湾奥部では水深 10 m から 20 m の平坦な海底で顕著に発生し（日本海洋学会 1985）、大阪湾では水深 20 m の等深線より湾奥側に生じやすいが、気候条件によって一時的に酸素濃度が上昇することもあるようだ（城 1989）。気温の降下、日照時間の減少、北よりの風の増加が起こる気候条件では海水が鉛直混合しやすく、酸素が水塊中に届きやすくなる。一方で、気温が継続的に高温に保たれることにより表面海水も高温で持続するような条件下においては貧酸素水塊が居座る結果となる。

内湾の比較的深所で発生した貧酸素水塊が浅所へと拡大すると、水産資源やその他の浅所に豊富に生息する生物相への甚大な被害が生じうる。そのような貧酸素水塊の拡大は吹送流の方角によって変化する。例えば東京湾では夏から初秋にかけて岸から沖に向かう風が吹くとき、海水底層に生じている貧酸素水塊が海岸付近に湧昇する。貧酸素水塊には嫌気的な生物過程で還元的に生じた硫化水素が含まれており、これが湧昇し大気中の酸素と反応すると硫酸銅など青色の硫化物を生成する。この現象を東京湾では青潮と呼んでおり、三河湾では苦潮と呼ばれている（風呂田 1987）。

【生物への影響】

溶存酸素量は 3.0 ml/L 以上あれば海洋生物には何ら障害は生じないとされているが、2.0 ml/L から 3.0 ml/L では魚介類の生理生態に負の影響を来たし、1.0 ml/L から 2.0 ml/L で致死にいたるとされる（関口 2007）。貧酸素水塊の影響を受けた海底環境では底生動物群集が単調となり、また生物現存量が大きく低下する。酸素濃度低下と出現種数との関係は

海域によって大きく異なる。図 2 に東京湾での例を示す。底質環境が良好と考えられる盤州干潟周辺の 20 m 以浅の海底では酸素濃度が低下しても明瞭な底生動物種数の低下は見られていない。溶存酸素濃度 1 ml/L 以下でも 20 種以上が生息していた。一方、貧酸素発生期に無生物状態が観察される湾奥部の水深10 m以深の海底では種数は20種以下であり、とくに溶存酸素濃度 1 ml/L では著しい減少が見られた。さらに水質悪化が最も深刻である浚渫による窪地では酸素が存在している場合であっても底生動物種数は1種以下であった。酸素回復期の東京湾奥部の海底表面に多く出現する主要な底生動物としては、マコガレイ、イシガレイ、シャコ、エビジャコ、クシノハクモヒトデなどがあり、これらは貧酸素化が現在ほど激しくなかった時代においては夏期であっても湾奥部全域に広く生息していた（Kubo & Asada 1957）。

このように季節によって貧酸素水塊が発達する海域では年間を通じて底生動物が生息し続けることが困難である。このような海域においての存続可能性は底生動物の遊泳能力とも関係する。例えば、大阪湾のマアナゴでは夏期の湾奥部における貧酸素水塊発達に伴い、餌となる小型魚類や甲殻類の分布と共に移動する様子が見られている（米田 2003）。また、魚種によって貧酸素からの逃避の仕方は異なるようである。アメリカの例では、魚類やガザミ類は貧酸素化が進行すると深層の貧酸素水塊から逃避するのに対し、シャコ類は耐性濃度を超えるギリギリまで深層に留まっていることが報告されている（Phil ほか 1991）。

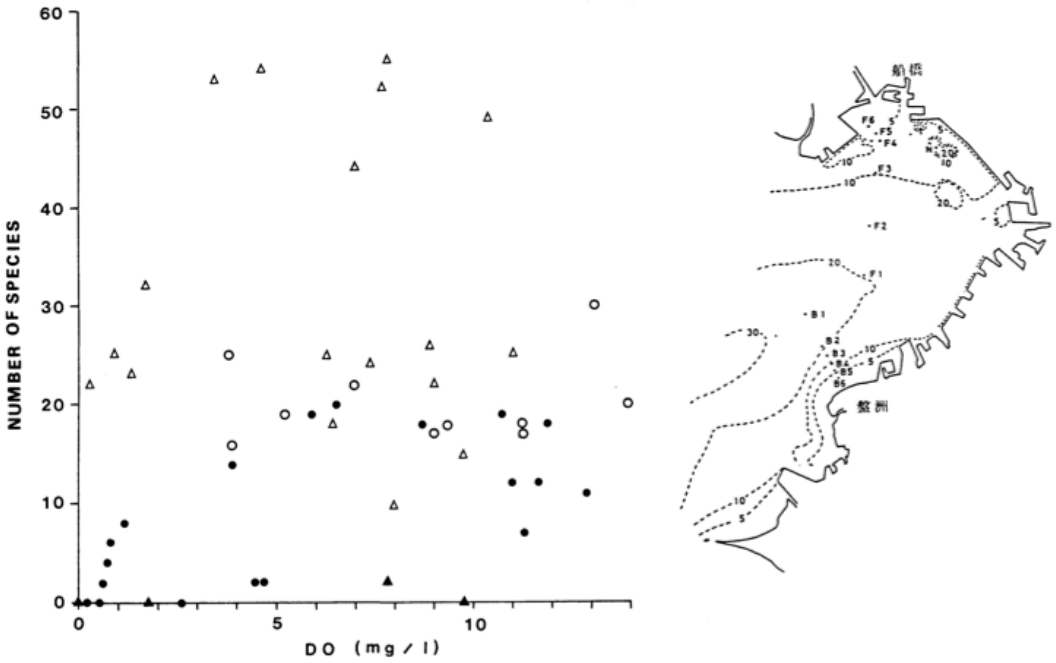

図 2 低酸素期の東京湾における底層水の酸素濃度と底生動物種数の関係。シンボルの違いは地点の違いを表す。△：盤州干潟周辺の地点（良好な生息環境）、○：湾奥部の浅所、▲：掘削による窪地、●：東京湾中央部（風呂田 1991 の図を引用）

底生動物の長期的な生息を保全していくためには、短時間での生存可能性を考えるだけでは不十分であり、貧酸素水塊の底生動物への影響は生活史を通じて考える必要があるだろう。大型の魚類、甲殻類は生活史を通じてかなり広範囲の移動を行うことが知られている（図 3)。その範囲は m スケールから 1000 km スケールと幅広いものの、最も多くの種が集中しているのは数十 km のスケールである。すなわち地図上で見る市町村レベルから県レベルのスケールで生息場所を保全していく必要があることを示している。さらに、大型の底生動物では生活史段階によって生息場所を変更するグループが多数存在する（表 1)。典型的な例として、産卵場や幼体期の生育の場が藻場やごく浅い浅瀬であり、成長に伴い深場の砂泥底に移動するケースが知られている(Pittman & McAlpine 2001; Gillanders ほか 2003)。この場合もまた生活史を通じての移動スケールは m スケールから 100 km スケールに及び、その多くは数十 km スケールである。このような動物の個体群の存続にとっては双方の生息場所が確保されていることが必須条件となる。すなわち貧酸素水塊の範囲拡大によって、その一方の生息場所が損なわれると他方を利用している生活史段階にも影響が生じる結果となりうる。都市部近郊の内湾域では幼体期の生息場所となりやすい浅瀬は埋め立ての危険にさらされ、さらに成体の生息場所となりやすい深場の砂泥底では貧酸素水塊が発生しうる。このような状況下では数多くの底生動物が消滅の危機にさらされるだろう。

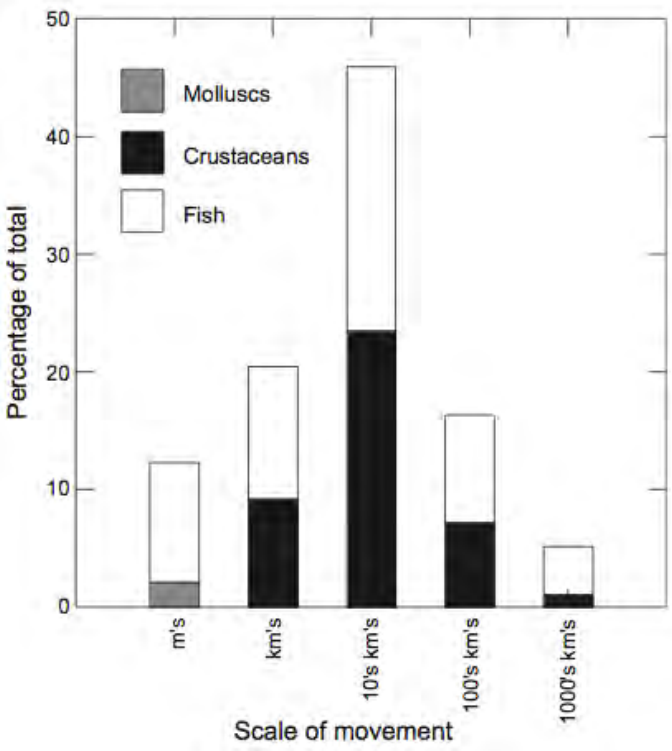

図 3 巻貝類、甲殻類、魚類の行動範囲のスケール（Gillanders ほか 2003 の図を引用）

表 1 魚類、甲殻類の行動範囲のスケール、幼体の生息場所、成体の生息場所（Gillanders ほか 2003 の表を引用）

Common name	Scientific name	Spatial scales of movement (m) 10^0 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6	Juvenile habitat	Adult habitat	Source
Queen conch	*Strombus gigas*	–	Shallow sand and seagrass	Deeper seagrass, sand, and algal plains	1, 2
Rockfish	*Sebastes* spp.	–	Surface canopy of kelp	Bottom habitats (9–13 m)	3, 4
Canary rockfish	*Sebastes pinniger*	–	Pelagic, shallow waters	Deeper water	4
Opaleye	*Girella nigricans*	–	Intertidal	Kelp forests	4, 5
Halfmoon	*Medialuna californiensis*	–	Offshore	Kelp forests	4
Kelp bass	*Paralabrax clathratus*	–	Shallow water among kelp	Deeper water	6
Spotty	*Pseudolabrus celidotus*	–	Shallow reef	Deeper reef	7
Banded morwong	*Cheilodactylus spectabilis*	–	Shallow reef	Deeper reef	8
Bocaccio	*Sebastes paucispinis*	——	Kelp forests	Deeper water	4
Spiny lobster	*Panulirus argus*	–	Shallow mangrove	Coral, sand, rock rubble	9
Ornate spiny lobster	*Panulirus ornatus*	——	Deep reefs (~19m)	Shallow reefs (<10–15 m)	10, 11
Northern pike	*Esox lucius*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
Ide	*Leuciscus idus*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
Burbot	*Lota lota*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
European perch	*Perca fluviatilis*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
Roach	*Rutilus rutilus*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
Grayling	*Thymallus thymallus*	–	Upstream of river estuaries	Estuaries	12
Western rock lobster	*Panulirus cygnus*	——	Limestone reef (<10 m)	Offshore waters (30–150 m)	13
Jinga shrimp	*Metapenaeus affinis*	——	Estuarine marshes	Offshore waters	14
Brown shrimp	*Penaeus aztecus*	——	Estuarine marshes	Offshore waters	15, 16
Brown tiger prawn	*Penaeus esculentus*	——	Seagrass (<2.5 m)	Deeper water	17
Banana prawn	*Penaeus merguiensis*	——	Mangrove estuary	Offshore waters	18, 19, 20
Mud crab	*Scylla serrata*	——	Estuaries	Open bay	21
Gag grouper	*Mycteroperca microlepis*	——	Seagrass	Nearshore reefs	22
Blue groper	*Achoerodus viridis*	——	Seagrass	Nearshore rocky reef	23, 24, 25
Nassau grouper	*Epinephelus striatus*	——	Shallow macroalgal meadows	Offshore coral reefs	26
School prawn	*Metapenaeus macleayi*	–	Estuaries	Nearshore waters	27
White prawn	*Penaeus indicus*	–	Estuaries	Offshore waters	28
Caramote prawn	*Penaeus keraturus*	–	River estuaries (<15 m)	Offshore waters (>25 m)	29
Eastern king prawn	*Penaeus plebejus*	——	Estuaries (<6 m)	Nearshore waters	30, 31
Green tiger prawn	*Penaeus semisulcatus*	–	Bare substrate in bays (~10 m)	Offshore waters (25–50 m)	32
Dungeness crab	*Cancer magister*	–	Intertidal estuaries, shallow sandy waters	Subtidal estuaries, sandy coast	33
Barramundi	*Lates calcarifer*	——	Coastal swamps and tidal creeks	Estuaries, nearshore waters, adjacent streams	34, 35
California halibut	*Paralichthys californicus*	–	Estuaries and shallow sandy coast	Sandy coast and shelf	36, 37
English sole	*Pleuronectes vetulus*	–	Estuaries and shallow sandy coast	Sandy coast and shelf	38, 39
Yellowtail rockfish	*Sebastes flavidus*	–	Estuaries	Open coast	40
Flathead mullet	*Mugil cephalus*	–	Shallow banks of estuaries	Streams, estuaries and beaches	41
Sole	*Solea solea*	——	Brackish and estuarine waters	Offshore waters	42, 43
Tailor/bluefish	*Pomatomus saltatrix*	–	Estuaries	Sandy nearshore coast	44
Green rock lobster	*Jasus verreauxi*	——	na	na	45, 46
Pink shrimp	*Penaeus duorarum*	——	Estuaries and shallow coast	Offshore waters	47, 48
Blue crab	*Callinectes sapidus*	——	Shallow, vegetated estuaries	Deep, unvegetated estuaries	49
Spider crab	*Maja squinado*	——	Coastal kelp forest (<15 m)	Deep offshore water (40–60 m)	49

【参考文献】

風呂田利夫（1987）東京湾における青潮の発生．*水質汚濁研究* 10: 470–474

風呂田利夫（1991）東京湾内湾底生動物の生き残りと繁栄．*沿岸海洋研究ノート* 28: 160–169

Gillanders BM, Able KW, Brown JA, Eggleston DB, Sheridan PF (2003) Evidence of connectivity between juvenile and adult habitats for mobile marine fauna: an important component of nurseries. *Marine Ecology Progress Series* 247: 281–295

環境省水環境部閉鎖性海域対策室（2002）瀬戸内海における海砂利採取とその環境への影響（瀬戸内海海砂利環境影響評価調査最終とりまとめ）

Kubo I, Asada E (1957) A quantitative study on crustacean bottom epifauna of Tokyo Bay. *J. Tokyo Univ. Fish.* 43: 249–289

関口秀夫（2007）伊勢湾の富栄養化と貧酸素化現象―現状、課題および将来展望―、三重県

内藤了二，中村由行，今村均，佐藤昌宏（2006）浚渫跡地の修復に関する施工上の影響と研究開発課題の抽出．*土木学会海洋開発論文集* 22: 649–654

中村由行（2010）全国の浚渫窪地の現況と三河湾における埋め戻し修復．*水産工学* 46: 229–233

日本海洋学会沿岸海洋研究部会（1985）日本全国沿岸海洋史．東海大学出版会

沼田真，風呂田利夫（1997）東京湾の生物誌．築地書館

宗方鉄生，松永信博，櫨田操，小松利光（1991）九州地区における海砂利採取の現状と沿岸環境に及ぼす影響調査．*土木学会西部支部研究発表会講演概要集* 196–197

Phil L, Baden SP, Diaz RJ (1991) Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustacean. *Marine Biology* 108: 349–360

Pittman SJ, McAlpine CA (2001) Movements of marine fish and decapod crustaceans: process, theory and application. *Advances in Marine Biology* 44: 206–294

高橋暁，湯浅一郎，村上和男，星加章（2005）瀬戸内海の海砂採取周辺海域における透明度の変化と藻場分布の関係．*沿岸海洋研究* 42: 151–159

柳哲雄（1989）貧酸素水塊のまとめ．*沿岸海洋研究ノート* 26: 141–145

米田佳弘，吉田司，小山善明（2003）レーダー画像解析による大阪湾のマアナゴ漁場の変動把握．*水産海洋研究* 67: 1–8