

都市海浜における底質の非一様性を考慮した酸素消費量の推定

Estimation of Dissolved Oxygen Consumption in Sand Beach Inhomogeneously Contaminated

入江政安¹・窪田勇輝²・中辻啓二³・西田修三⁴

Masayasu IRIE, Yuki KUBOTA, Keiji NAKATSUJI and Shuzo NISHIDA

Sand beaches in the urbanized regions, the area of which has decreased dramatically in Osaka Bay, are valuable places of recreation and relaxation. However, they are often located in the remotest area of estuaries, contaminated, reductive and deficient in oxygen. The presenting paper investigates dissolved oxygen consumption of a heavily contaminated sand beach in the head of Osaka Bay. Several experiments are carried out in order to raise the precision of undisturbed core sampling. The method of the sampling which is suitable for contaminated sand beach is suggested. This paper also clarifies temporal and spatial variability of dissolved oxygen consumption and estimates yearly change of dissolved oxygen consumption in the beach.

1. はじめに

都市域近傍の砂浜は限りある自然空間として価値のあるものである。しかし、前面海域の流動の停滞性が高い場合や水質が悪化している場合、底質が劣化して、酸素消費の大きい砂浜になり、海域の貧酸素化に影響を与えていることが多い。このような砂浜や前面海域の酸素消費速度の測定はベルジャー式の現地測定と不攪乱柱状採泥による室内実験に大別される。現地での直接測定の例としては、例えば、長尾ら (2000) や佐々木・前田 (2006) があり、この2つの方式の違いについては平野 (1998) 等の研究がある。また、干潟上など、静置可能な領域に対しては桑江 (2006) のような新しい測定法も提案されている。しかし、装置の簡便性や実験の容易さ、適用可能領域の広さから依然として不攪乱柱状採泥により酸素消費量が推定されることが多い。

中村ら (1993, 1996)、佐山ら (2002) では、静水中の酸素消費と流れがある場合の酸素消費が異なることを前提とした実験やモデル化が行われている。このような研究は採取した不攪乱コアを、現場海域に近い状態で酸素消費速度を測定するためのアプローチであり、不攪乱柱状による酸素消費速度測定法の高度化と言って良い。一方で、ある海域海底面の酸素消費量をより正確に推定するための不攪乱コアのサンプリング法についての議論は多くなく、経験的に採取本数などが決められていることが多い。汚濁した底質をもつ砂浜のように、酸素消費速度の時空間的変動が大きい場合には、サンプリング法

の高精度化が重要となる。本研究ではこのような海浜を含む水域の貧酸素化機構の解明を目的として、大阪湾奥部に位置する御前浜の酸素消費速度を計測し、砂浜の酸素消費量を推定する。この際、不攪乱柱状泥の採取本数や採泥厚などを変えて、最適なサンプリング法の検討を行う。加えて、酸素消費速度の定式化を行い、水温や底質に対する依存性について検討する。

2. 調査および解析の概要

今回対象とした砂浜は大阪湾奥部に位置する尼崎西宮芦屋港のさらに最奥部にある御前浜 (香爐園浜) である。御前浜は大阪湾奥部では唯一残された自然海浜であり、全長はおおよそ 900 m である。御前浜前面水域は図-1 に示すとおり、西側の芦屋浜と南東側の西宮浜の2つの埋立地により、海水交換を著しく妨げられ、開口部はわずかに、南側の幅 150 m、東側の幅 30 m の水路だけである。御前浜の底質に関する研究は石垣ら (2004, 2005) が挙げられる。前面海域は夏季に底面から水深 1 ~ 2 m の密度躍層まで貧酸素化し、底面直上はほぼ無酸素状態となる。このような閉鎖性水域の DO (溶存酸素) 濃度は底面直上の水温の影響が大きく、底泥による酸素消費が DO 環境に大きく寄与していることが分かっている。そこで、本論文では以下の方法で、御前浜の酸素消費量を推定する。

(1) サンプリング法の検討

不攪乱柱状採泥法におけるコアの径・高さ、採泥厚、攪乱の有無、直上水の DO の初期設定、などを変化させて、それぞれの酸素消費速度を測定し、解析する。また、サンプル数を多くすることで、酸素消費速度のばらつきを評価する。

(2) 砂浜の酸素消費速度調査

(1)の結果を基に、最適と考えられるサンプリング法を用いて、図-1 に示す St.1 ~ 5 の5点において採泥し、室内実験を行い、酸素消費速度を算出する。時空間的な

- | | |
|--------------|-----------------------------|
| 1 正 会 員 博(工) | 大阪大学大学院助教工学研究科地球総合工学専攻 |
| 2 正 会 員 修(工) | 元大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻博士前期課程 |
| 3 フェロー 工博 | 大阪大学大学院教授工学研究科地球総合工学専攻 |
| 4 正 会 員 工博 | 大阪大学大学院准教授工学研究科地球総合工学専攻 |

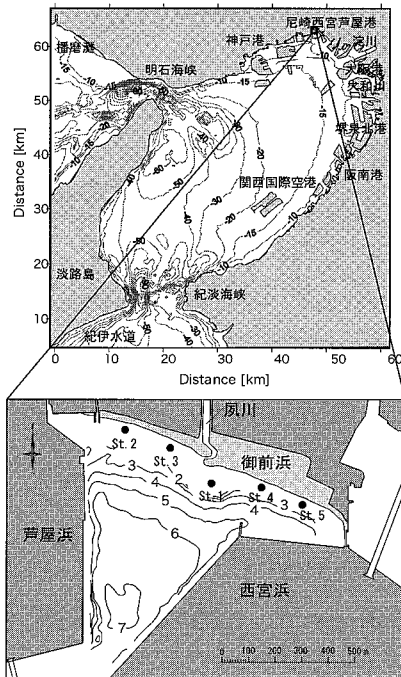


図-1 大阪湾と対象海域，調査地点図

非一様性について，気象等の影響を考慮して，評価する。

(3) 酸素消費速度式の算定

底質の pH，含水比，全硫化物， COD_{sed} ，強熱減量，ORP，および直上水の水温を計測し，酸素消費速度の水温および底質依存性を評価する。酸素消費速度の水温，底質との関係を明らかにし，定式化を行う。

(4) 砂浜の酸素消費量の推定

(3) で得られた式について，既知の前面水域の酸素消費速度と比較して考察するとともに，御前浜の砂浜部の酸素消費量を推定する。

3. 最適なコアサンプリング法の抽出

対象領域における最適なコアサンプリング法の決定と併せて，酸素消費速度算出法についての種々の条件についても比較検討を行う。採泥地点は図-1 に示す中央の St.1 で，夙川河口干潟に相当する。採泥したコアはそれぞれの実験の初期条件に応じた準備を行った後，DO 計 (Hydrolab 社製 QuantaG) を用いて，直上水の DO の経時変化を計測した。計測時間間隔は DO 濃度の変化に応じて異なる。酸素消費速度 ($\text{g/m}^2/\text{day}$) は，計測開始から直線的に DO が減少する期間 (およそ 6～10 時間程度) を対象に，DO 減少量を底泥の表面積と時間で割って算出したものである。なお，酸素消費速度の算出に当たっては，直上水は濾過せずにそのまま用いることとし，直上水についても暗条件にて同時に酸素消費速度を計測し，この値を差し引くことで，底泥による酸素消費速度を算出し

表-1 実験 1 の酸素消費速度測定結果 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)

ケース	最小値	最大値	平均	SD	採泥日
Case0	2.58	4.08	3.14	0.55	6/27
Case1	1.16	1.79	1.47	0.45	
Case0	2.63	5.83	4.14	1.04	7/10
Case2	1.68	2.42	2.05	0.52	

表-2 実験 2 の酸素消費速度測定結果 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)

採泥厚	最小値	最大値	平均	SD	採泥日
5 cm	4.00	4.43	4.26	0.23	8/24
10 cm	4.42	5.01	4.72	0.30	
15 cm	4.15	5.91	5.00	0.88	
20 cm	4.39	5.67	5.02	0.64	
25 cm	4.41	5.45	4.97	0.52	

表-3 実験 3 の酸素消費速度測定結果 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)

攪乱	最小値	最大値	平均	SD	採泥日
なし	2.63	5.83	4.14	1.04	7/10
あり	—	—	2.33	—	

た。各実験では，特に言及のない限り，直上水はカラム最上部まで満たし，水温は現地の水温を維持した。

(1) 実験 1：カラム径およびカラム高さの影響

カラムの標準のもの (以下，標準カラムと呼ぶ) は内径 10.5 cm，長さ 50 cm で，採泥厚が 25 cm のものである。この標準カラム (Case0) と直径 5 cm，高さ 50 cm のカラムを用いた場合 (Case1)，直径 10.5 cm，高さ 25 cm のカラムを用いた場合 (Case2) の 3 つの形状で比較を行った。いずれも，採泥厚はカラム長さの半分とした。Case0 のサンプル数は 9 本，Case1，2 のサンプル数は 2 本である。実験結果を表-1 に示す。Case1，2 と Case0 より酸素消費速度が小さくなっている。コア径が小さい場合，採泥時の攪乱の影響が大きくなること，Case2 については採泥深が浅かったことが原因であると考えられる。

(2) 実験 2：採泥厚の影響

標準カラムにより，採泥厚を 5，10，15，20，25 cm の 5 ケースに変化させて採泥し，測定を行った。サンプル数は各 3 本である。測定結果を表-2 に示す。採泥厚が 5 cm および 10 cm の場合，15 cm 以上のカラムよりも 5～14 % 程度小さい値となった。一方，採泥厚が 15 cm および 20 cm の場合は標準カラムと同程度の値となった。

(3) 実験 3：攪乱の影響

現場での酸素消費速度は底質の鉛直構造や表面付近での状態に左右されると予想されるため，採泥は現場底泥を乱さず，変質させずに行うことが要求される。標準カラム (攪乱なし) と，不攪乱柱状採泥後，サンプルを取り出し，かき混ぜたカラム (攪乱あり) の酸素消費速度の測定を行った。測定結果を表-3 に示す。攪乱ありのサンプル数が 1 本と少なく，精度には疑問の余地があるが，攪乱ありのカラムの酸素消費速度は攪乱なしのカラムの最小値より小さいことが分かる。

表-4 実験4の酸素消費速度測定結果(g/m²/day)

直上水 DO	最小値	最大値	平均	SD	採泥日
現地 DO	1.27	2.03	1.64	0.25	8/8
飽和状態	2.98	5.92	3.76	0.99	

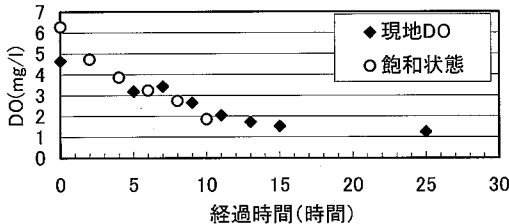


図-2 直上水 DO の経時変化

表-5 実験5の酸素消費速度測定結果(g/m²/day)

測定場所	最小値	最大値	平均	SD	採泥日
室内実験	4.78	6.20	5.46	0.62	8/2
現地実験	3.00	9.77	5.81	2.54	

(4) 実験4：直上水 DO の影響

酸素消費速度を算出するにあたり、初期の直上水の DO 濃度を現地の DO にするか、一度飽和させてから計測するかについては議論になりやすい点である。表-4 に、測定開始時の直上水の DO 濃度を現地の値にした場合と飽和させた場合のそれぞれについて、酸素消費速度を示す。採泥時の現場 DO 飽和度は 60 % で、サンプル数は共に 9 本である。初期の直上水 DO 濃度が現地の値の場合、酸素消費速度は、飽和させた場合に比べて、半分以下の値になっている。これは本研究では、酸素消費速度を算出するにあたり、計測開始後の DO が直線的に減少する時間帯の勾配をもって酸素消費速度としているためである。図-2 に示すとおり、開始時の DO が現地の DO の場合、飽和した場合に比べて、最初の 10 時間の勾配が小さく、したがって酸素消費速度も小さくなる。対象領域は DO の日変動が大きい。このため、酸素消費速度の季節変化や水温依存性を検討するためには、採泥時間帯に左右されない飽和した状態から計測するのが望ましい。

(5) 実験5：現地実験との比較

現地での測定は、直上水 DO が飽和状態になる日を選び、干潮時に内径 10.5 cm、長さ 1 m の管を海底面に 25 cm 挿し、満潮時を避けて 3 時間ごとの計測を行った。現地実験と室内実験のサンプル数はそれぞれ 8 本、4 本である。同日に採泥し、実験室内で計測した酸素消費速度との比較を表-5 に示す。現地測定による酸素消費速度平均値は室内実験の酸素消費速度平均値とほぼ同じであるが、ばらつきが大きくなっていることが分かる。これは潮の干満に応じて、カラムが水表面より上に出していることで、水温がカラムによって差が生じたことなど、現場での外的条件のばらつきが大きかったことが原因

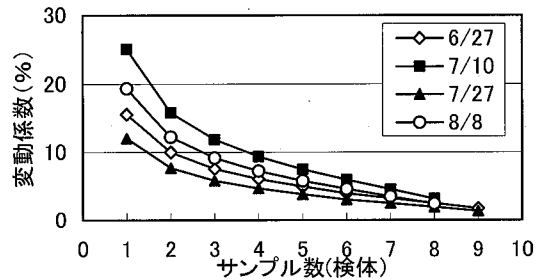


図-3 サンプル数と変動係数

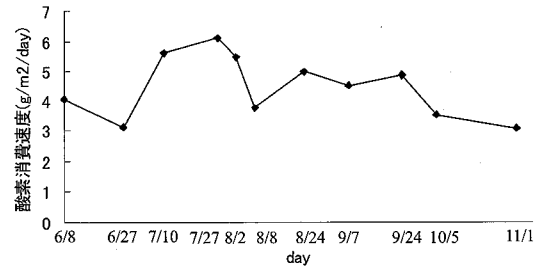


図-4 St.1 における酸素消費速度の季節変動

因であると考えられる。

(6) 実験6：サンプル数についての検討

酸素消費速度を計測するときに、サンプル数をいくつにするかは重要な課題である。St.1 における標準カラムによる 4 回の観測結果から、ばらつきの大きさを表す変動係数（標準偏差を平均で除したものの百分率）を算出する。本数ごとに表した変動係数を図-3 に示す。通常、環境測定では変動係数が 10 % 以下となるような分析法が求められる。本調査においても 10 % 程度以下の変動係数を目安とすると、この海域で酸素消費速度を計測するのに必要なサンプル数は 3 本以上であることが分かる。

(7) 最適なサンプリング法の提案

以上の検討結果から、この海域におけるコアサンプリング法は、①内径 10 cm、長さ 50 cm のサンプラーを用い、②なるべく攪乱しないように 15 cm 以上の泥厚で、③ 3 検体以上採泥したうえで、④直上水を飽和してから測定を行うことが最良であると考えられる。また、室内実験と現場での測定結果に大きな差が認められなかったことから、実験の容易さを考えれば、室内での実験で十分であると考えられる。

4. 御前浜の酸素消費速度

(1) 酸素消費速度の季節変動

精度検証を行った上記の方法で、御前浜における酸素消費速度を計測した。夙川河口干潟上の地 St.1 において、2006 年 6 月～11 月までのほぼ 2 週間に 1 回の割合で採泥し、酸素消費速度を算出した。図-4 に酸素消費速度の季節変動を示す。この地点の酸素消費速度は大阪湾奥部の

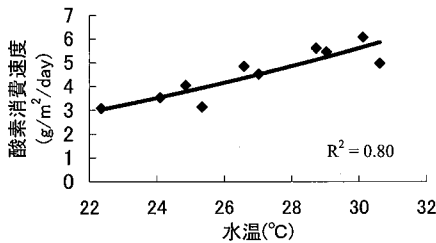


図-5 水温と酸素消費速度の関係

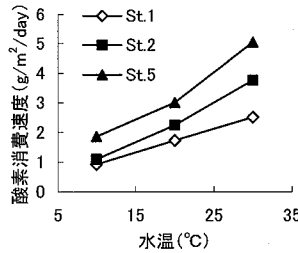


図-7 水温と酸素消費速度の関係

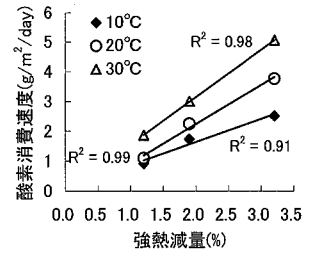
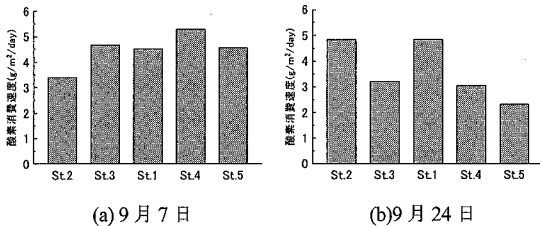


図-8 強熱減量と酸素消費速度の関係



(a) 9月7日 (b) 9月24日

図-6 酸素消費速度の空間変化

一般的な酸素消費速度の値 $1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ をはるかに超えて、 $3 \sim 6 \text{ g/m}^2/\text{day}$ で推移していることが分かる。また、夏季に水温が上昇するに従い、酸素消費速度が大きくなっていることも分かる。St.1 における酸素消費速度と水温の関係を図-5 に示す。近似曲線は累乗関数であるが、酸素消費速度と水温の相関は良いと言える。

(2) 御前浜全域の時空間変動

図-1 に示す 5 地点において、2006 年 8 月～11 月の 2 週間に 1 回の割合で採泥し、酸素消費速度を算出した。降雨の状況をもとに、この中から晴天時と降雨後の 2 回について、酸素消費速度の空間変化を図-6 に示す。降雨後の 9 月 7 日の観測結果は河口より東側の St.4 および St.5 において酸素消費速度が高くなっている。これは 9 月 7 日には直前に降雨があり、夙川河口から出水があった影響を受けているものと推測される。一方、晴天時の 9 月 24 日においては泥粒分の多い St.1 と流れの滞留しやすい最西部の St.2 における酸素消費速度が高くなっている。

5. 御前浜の酸素消費量の推定

(1) 酸素消費速度の定式化

図-5 に示したように、季節変動調査で得られた酸素消費速度と水温の関係を、式 (1) で表される累乗関数で近似した結果、式 (2) が得られた。

$$Y = a \cdot \theta^{(T-20)} \quad (1)$$

$$Y = 2.665 \times 1.077^{(T-20)} \quad (2)$$

ここで、 Y : 酸素消費速度 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)、 θ : 温度係数、 a : 20°C のときの酸素消費速度 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)、 T : 水温 ($^\circ\text{C}$) である。式 (2) は St.1 での酸素消費速度と水温

表-6 推定式を用いた酸素消費速度推算値 ($\text{g/m}^2/\text{day}$)

調査	地点	強熱減量 (%)	水温 ($^\circ\text{C}$)	式(2)による速度	式(7)による速度
I	中央水域	13.4	25.2	3.92	13.6
	St.2 沖側	11.2	28.0	4.82	13.3
	St.1 沖側	2.0	28.0	4.82	3.31
	St.5 沖側	11.5	28.0	4.82	13.6
II	中央水域	7.9	12.0	1.47	4.26

調査 I: 国交省 (2003) 調査 II: 著者ら

の関係式であって、砂浜全体を表していない可能性がある。そこで、地点による違いを明らかにするため、追加試験を行った。2006 年 11 月 28 日に、St.1, 2, 5 の 3 点で追加試験用に各 6 本のサンプルを採取し、同時に底質分析用に 1 本のサンプルを採取した。底質分析は 20 cm または 25 cm までは 5 cm ずつに分割し、粒度組成、pH、含水比、全硫化物、 COD_{sed} 、強熱減量、ORP を計測した。追加試験は、1 地点につき、 10°C 、 20°C 、 30°C の恒温槽に各 2 本入れ、酸素消費速度を計測した。図-7 に得られた酸素消費速度と水温の関係を示す。

この結果から算出される酸素消費速度と水温の関係式は次のようになる。

$$\text{St.1: } Y = 1.610 \times 1.074^{(T-20)} \quad (3)$$

$$\text{St.2: } Y = 2.134 \times 1.059^{(T-20)} \quad (4)$$

$$\text{St.5: } Y = 3.042 \times 1.052^{(T-20)} \quad (5)$$

式 (2)～(5) の係数が異なるのはサンプルに用いた底質が異なることが主因である。そこで、追加試験で得られた酸素消費速度と底質各項目との相関分析をおこなったところ、酸素消費速度と泥深 0～5 cm の強熱減量との相関が最も良く、図-8 に示すように直線近似で表すことができる。そこで、底質の影響を考慮した次式で近似した結果、式 (7) が得られた。

$$Y = (aX - b) \cdot \theta^{(T-20)} \quad (6)$$

$$Y = (0.719X + 0.753) \times 1.053^{(T-20)} \quad (7)$$

ここで、 X : 強熱減量 (%), a , b : 定数である。

式 (2) および式 (7) を検証するための十分なデータはない。そこで、これまでの御前浜前面海域で底質を調査した事例を基に、既知の強熱減量と水温から、前面海域の酸素消費速度を試算した。いずれの調査点も本研究の

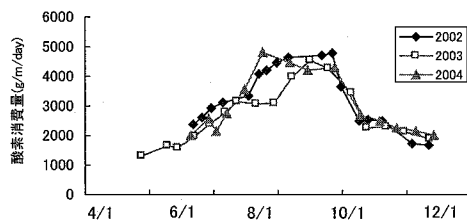


図-9 御前浜の酸素消費量の季節変動

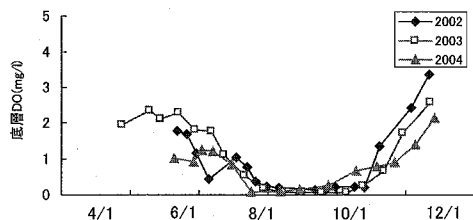


図-10 前面水域の底層 DO の季節変動

観測点よりも沖側で、水深も 1～6m 深い地点である。式(2)、式(7)に代入した結果を表-6 に示す。式(7)から算出される酸素消費速度は非常に高くなっている。これは式を算出したサンプルの強熱減量(図-8)に比べて、既往のデータの強熱減量(表-6)がはるかに大きく、外挿による計算になっていることが原因である。今回得られた式は御前浜の砂浜での関係式であり、前面水域全体に拡大して適用するのは困難であると言える。

(2) 酸素消費量の推定

(1)で得られた式を用いて、御前浜の砂浜部の酸素消費量を概算する。ここでは、著者らが 2002～2004 年に計測した御前浜前面水域の密度躍層より上層の水温データを用いて、3カ年の酸素消費量を推定した。酸素消費量の単位は g/m/day で、推定された酸素消費速度に砂浜の全長を掛けた、岸沖方向単位幅あたりの酸素消費量を示している。9月までは式(2)を、10月以降は式(7)を用い、強熱減量は今回の調査結果を用いる。図-9 に得られた酸素消費量の季節変動を、図-10 に前面水域における底層の DO の季節変動を示す。8月から9月においては砂浜の酸素消費量の各年の差が大きい。しかし、前面海域の底層 DO がほぼ無酸素状態であるため、砂浜の酸素消費量の違いが前面海域に及ぼす影響を見ることはできない。その一方で、貧酸素水塊が発達する初夏および解消する秋季においては、砂浜の酸素消費が多い年ほど貧酸素化が進み、あるいは、解消が遅れることが分かる。

6. ま と め

本研究では、港湾域内に存在する閉鎖性小水域における貧酸素化に及ぼす砂浜の影響を評価するために、汚濁した砂浜における酸素消費速度の調査を実施し、酸素消費量の推定を行った。また、コアサンプリング法につい

て精査し、手法についての提案を行った。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ①汚濁した海浜の酸素消費速度測定のための最適なサンプリング手法として、a) 本対象海浜では採泥厚は酸素消費速度がほぼ一定となる 15cm 以上とする、b) DO の直線的な減少を捉えるために直上水を飽和後、測定を開始する、c) 夏季の直上水の酸素消費速度は高く、別途採水し測定を行う、d) 変動係数が 10% 程度となるよう各地点 3 本ずつ採泥を行う、等が挙げられる。他の同様の海浜においても適用可能であるかは不明である。
- ②底泥の酸素消費速度は、水温に依存しており、平常時は最西部海域で高く、最東部海域で低いという傾向を示す。降雨後は、東部で高く、最西部海域で低いという傾向を示した。これは夙川から流入した陸域負荷が東部の海域で堆積しやすいためであると推測される。
- ③底泥の酸素消費速度は、底泥表層(0～5cm)の強熱減量と良い相関関係にあり、このことから、本海浜における酸素消費速度の定式化を行った。各年における水温の違いから、貧酸素水塊の発達・解消する時期においては、底層の DO と砂浜の酸素消費に関連があることが示唆された。

参 考 文 献

- 石垣 衛・入江政安・中辻啓二・山本 緑(2005):大阪湾奥の物理的攪乱と貧酸素水塊が二枚貝の生息域に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 1181-1185.
- 石垣 衛・上月康則・大谷壮介・西川直仁・穴倉知宏・村上 仁(2004):大阪湾奥の干潟に作用する物理的攪乱が生物生息場におよぼす影響, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1171-1175.
- 桑江朝比呂・神尾光一郎・井上徹教・三好英一・内山雄介(2006):堆積物による酸素消費と生成-渦関法を適用した新たな測定手法の開発-, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1411-1415.
- 国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所(2003):「閉鎖性海域における環境修復技術検討基礎調査」報告書.
- 佐々木淳・前田周作(2006):酸素消費速度に着目した干潟・浅瀬の環境評価, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1046-1050.
- 左山幹雄・相馬明郎・高杉由夫(2002):沿岸域の水-堆積物界面近傍における酸素の動態に対する流速の影響の実験的解析, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 996-1000.
- 長尾正之・橋本英資・朱小華・吉田みゆき・高杉由夫(2000):広島湾における海底酸素消費量の連続測定, 土木学会論文誌, No. 663/II-53, pp. 109-117.
- 中村由行・御子神学・Heinz G. Stefan(1993):閉鎖性水域における底質の酸素消費速度-流れの影響のモデル化, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 986-990.
- 中村由行・井上徹教・山室真澄・神谷 宏・石飛 裕(1996):未攪乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費-溶出実験, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1091-1095.
- 平野敏之監修(1998):沿岸の環境圏, フジテクノシステム, p. 625.