

(8) 再浮遊した海域底泥の酸素消費実験

運輸省港湾技術研究所 正会員 ○細川恭史

〃 三好英一

〃 正会員 堀江 毅

1. まえがき

内湾や河口域では、有機物に富む粒径の細かい物質が堆積しやすい。こうした堆積有機底泥は、流れ、波あるいは各種工事などで巻き上げられて浮遊けん濁すると、堆積状態にある場合よりも酸素消費などの点でより大きな影響を水質に与える可能性があると言われている。

底泥の酸素消費は、嫌気的条件下で生成された還元物質の化学的な酸素消費と、含有有機物の微生物学的分解作用による酸素消費とから成り立っている。前者は、比較的短時間のうちに起こり、瞬時の酸素消費(IOD)などとも呼ばれている。これに対し後者は、有機物の微生物学的分解性に依存し、水質におけるBODに相当する。本研究は、BOD試験に準拠した室内実験を行うことにより、浮遊けん濁底泥の酸素消費特性を酸素消費ポテンシャルと消費速度とで表現することを試みたものである。この解析には、富栄養化現象に対するAGP(潜在藻生産力)と生産速度、河川からの流出現象に対する貯溜と流出などの考え方を参考している。

なお、底質の酸素消費に影響を及ぼす環境因子としては、水温、海水のDO、乱れの強さ、pH、塩分などが考えられる。ところが海域内では塩分の変化は淡水域に比して小さく、また浮遊けん濁海水のpHの変化も小さいと思われる。さらに、舞い上って浮遊している粒子表面は絶えず新しい海水と接触しており、乱れの強さあるいは攪拌強度はあまり影響しないと思われる。通常、海水のDOが低いと酸素消費がおさえられると言われているが、こうした影響が顕著になるのはかなり低いDO値の場合と考えられる。海底泥が舞い上っている場では相当強い混合も起こっていることが普通であり、局所的なDOの低下域の影響も大きくないであろう。以上のように考えて、本研究では浮遊けん濁濃度、水温および底泥含有有機物の3因子に限定して、浮遊けん濁底泥の酸素消費との関係を系統的に調べてみた。

2. 酸素消費実験

酸素消費試験用の反応ビンには、図-1に示されるような原理のものを用いた。このビンの検水中のDO濃度の減少は、空隙部分中の空気からの酸素溶解をもたらし、空気圧の減少量としてマンオメータにて読みとることができる。反応ビンは恒温水槽中に水封しており、この恒温水が減圧量に応じてマンオメータに侵入してくる。呼吸量測定のためのワールブルグ検圧計と同じ原理ではあるが、検水量が200mlと大きいこと、検水をマグネチックスターラーで攪拌していること、水マンオメータであることなどの特徴がある。空隙部の空気容積は約130mlで、ここには発生CO₂ガスを吸収するアルカリ溶液用の小皿がそなえられている。毎水自体のBODの影響を除

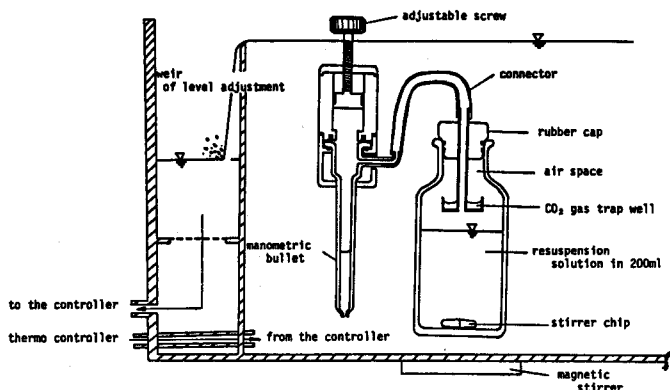


図-1 実験装置（反応ビン）

き、大気圧の変動の影響を補正するため、けん濁物を含まない溶媒海水についてもブランク試験として同時に試験を行っている。

所与の攪拌強度でもけん濁が十分起こり、かつマンオメータの読みとり精度以上の消費量があるように実験条件を設定した。

また、マンオメータ内への水の侵入が、検水中でのDO消費に見合う速度で起こるためには、ビン内の空気部から検水への酸素の移動速度が検水中のDO消費速度に比して十分大きい必要がある。亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを溶解させた無機海水を用いて酸素の溶解速度を調べたところ表-1のような値を得た。表-1には、DOが0 mg/lの際の溶解速度とともに、再び気係数(k_2)の値も示した。後述する底泥け

表-1 実験装置の特性(溶解速度と再び気係数)

temperature		8°C		18°C		20°C		28°C	
stirrer chip size	bottle No.	rate (r)	k2	rate (r)	k2	rate (r)	k2	rate (r)	k2
normal chips (L=25mm)	# 1	.757 (.987)	.398	1.381 (.998)	.874	2.104 (.999)	1.377	2.406 (.997)	1.807
	# 2	.875 (.994)	.460	1.192 (.994)	.754	1.740 (.998)	1.139	2.348 (.997)	1.763
	mean	.816	.429	1.287	.814	1.922	1.258	2.377	1.785
large chips (L=38mm)	# 1	2.408 (.879)	1.266	2.514 (.999)	1.591	3.005 (.998)	1.967	3.324 (.997)	2.495
	# 2	2.601 (.956)	1.368	2.755 (.998)	1.744	4.082 (.998)	2.671	3.389 (.997)	2.544
	mean	2.505	1.317	2.635	1.668	3.544	2.319	3.357	2.520
temperature measured		8.8°C		18.5°C		20.2°C		29.5°C	

ん濁液の酸素消費実験において、溶解速度は消費速度に対して十分大きいことを確認した。

大阪湾湾奥底泥を用いた酸素消費量の長期経時変化を図示すると、図-2のようになった。ここに用いた底泥はCOD 10mg/gの湿泥であり、200 ml 中に乾重量で2.8 g 相当(14000 mg/l)の濃度でけ

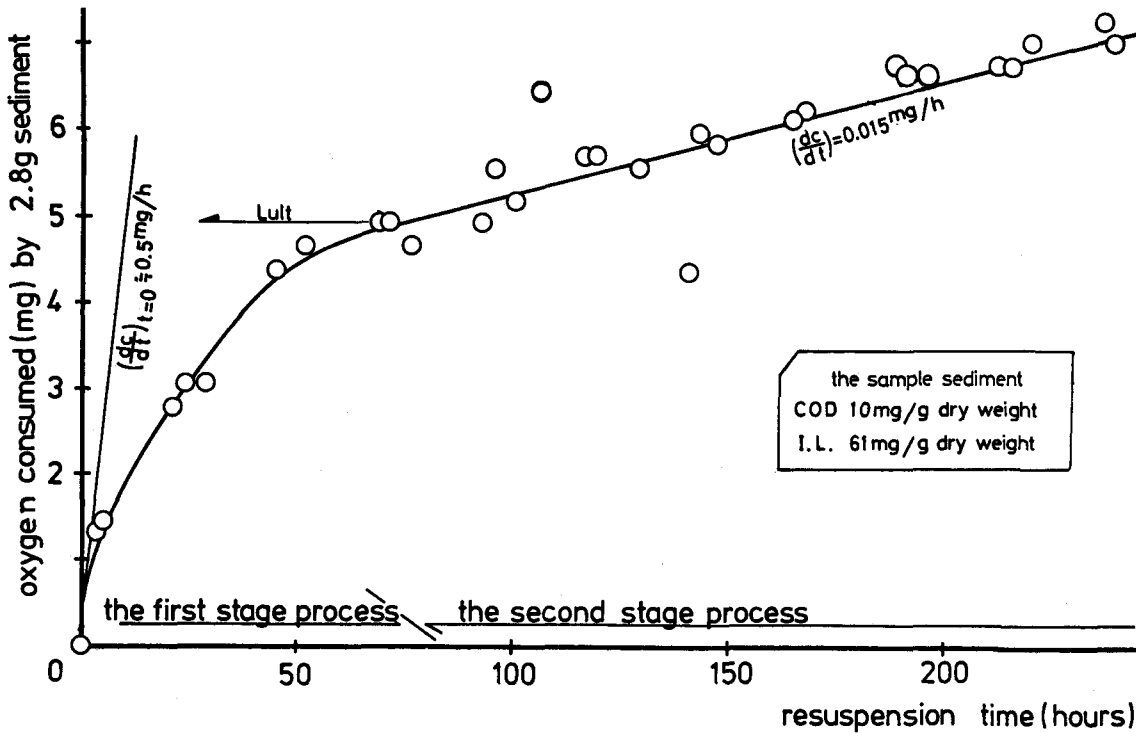


図-2 底泥の酸素消費量長期経時変化図

ん濁させたものである。図より、けん濁開始直後に最も大きな酸素消費速度（0.5 mg/h）を示し、速度は以後ゆっくりと減少し、やがて非常に遅い速度（0.015mg/h）に漸近する（第1段階の酸素消費過程）。けん濁後2～4日後には、消費速度はこの遅い速度で安定し、ゆっくりとした消費過程が続く（第2段階の酸素消費過程）。こうした2段階の過程は、他の底泥についても観察され、様々の底泥での実験例から、第1段階の継続時間は水温に大きく依存し、けん濁濃度にはあまり関係しないことがわかった。第1段階の継続時間を表－2に示す。舞い上り底泥による酸素消費の影響を考える際には、底泥の浮遊・沈降時間、酸素消費速度などから見て、

第1段階の酸素消費過程が重要となってくる。実験継続時間は、おおむね表－2に示す時間程度までで十分と思われる。

表－2 第1段階過程の継続時間

water temperature (°C)	5	8	10	18	20	28
duration (hours)	250～300	100	80～100	30～50	30～50	38

3. 酸素消費過程のモデル化

第1段階の酸素消費は、時間とともに速度が減少するカーブを描いており、易分解性有機物の酸化過程と同様に一次反応式で無理なく表現できる。

$$\frac{dL}{dt} = -k \cdot L \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Lは酸素要求量で表わした有機物もしくは還元物質濃度（mg/l）、tは時間（h）、kは速度を示す係数（1/h）である。酸素消費量Y（mg/l）は、Lの減少に対応して増加する。結局、(1)式は、

$$Y = L_{ult} \cdot \{ 1 - \exp(-k \cdot t) \} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで L_{ult}は最終酸素消費量（mg/l）を示す。すなわち、各時刻の酸素消費量は、第1段階過程での最終酸素消費量（酸素消費ポテンシャル）と消費速度を示す係数との両パラメータにより記述できる。実験装置より読みとった各時刻の消費量データより、Thomas法 および最小二乗法を用いて(2)式にあてはめ、L_{ult}、kの両パラメータ値を算定することができる。

4. 解析結果

(1) 影響因子とパラメータ値の変化

表－3 水温・けん濁濃度の変化による影響

temperature		10°C					15°C					20°C				
No.	concentration	dry weight in 200ml	L _{ult}	unit L _{ult}	k	1/h	d.w. in 200ml	L _{ult}	unit L _{ult}	k	1/h	d.w. in 200ml	L _{ult}	unit L _{ult}	k	1/h
		g	mg/200ml	mg/g	1/h		g	mg/200ml	mg/g	1/h		g	mg/200ml	mg/g	1/h	
1	0.27g/200ml	0.266	1.147	4.316	0.06846		0.266	1.326	4.988	0.08519		0.266	0.880	3.310	0.09284	
2		0.292	1.426	4.878	0.07041		0.266	1.260	4.740	0.09898		0.266	0.944	3.550	0.12878	
3	0.8 g/200ml	0.797	2.919	3.661	0.05745		0.797	2.362	2.962	0.08064		0.797	2.803	3.515	0.09530	
4		0.877	2.990	3.408	0.05869		0.797	3.175	3.982	0.08558		0.797	2.307	2.893	0.12148	
5	1.6 g/200ml	1.595	5.918	3.711	0.07004		1.595	4.078	2.557	0.05997		1.595	4.836	3.032	0.08666	
6		1.754	6.134	3.497	0.06099		(1.595)	2.990	(1.875)	0.06378		1.595	6.159	3.862	0.09234	
7	2.4 g/200ml	2.392	8.546	3.573	0.06522		2.392	8.756	3.660	0.08044		2.392	8.192	3.424	0.08189	
8		2.419	8.630	3.568	0.06522		2.392	9.306	3.890	0.09083		2.392	9.170	3.833	0.09311	
mean	n=8 (n=7)	—	—	3.826	0.06456		—	—	3.592 (3.826)	0.08068		—	—	3.427	0.09905	
standard deviation	(n=7)	—	—	0.475	0.00472		—	—	0.995 (0.810)	0.01223		—	—	0.323	0.01568	
variation (S.D./mean)		—	—	0.124	0.073		—	—	0.278	0.152		—	—	0.094	0.158	
observed water temperature		10.0°C					15.0°C					20.0°C				
experimental duration		0～51 hours					0～45 hours					0～44 hours				

sample sediment; 0.266g dry weight/g wet weight, I.L.9.62t, taken from st.O-F in the Osaka Bay

けん濁濃度を変えた時のLultとkの値を表-3に示す。この表には、Lultをけん濁底泥の乾重量で除した単位乾重量あたりのLult (unit Lult mg/g)をも示してある。unit Lultはこの濃度範囲で安定しており、Lultがけん濁濃度に比例するとみなしてよいことがわかる。kはけん濁濃度には依存しない。

水温を変えた場合は、表-3に示すようにkは大きく変化するが、Lultもしくはunit Lultはあまり大きな変化を示さない。第1段階の酸化過程においても、温度に依存する反応過程が大きな部分を占めていることがわかる。通常、反応速度は温度定数(θ)の温度差乗に比例して増減する指数式で示される。表-3より求めた θ の値は、1.046となり、水質におけるBOD反応の θ の値などと比して妥当な値である。

底質の有機物含有量が異ると、両パラメータがどのように変化するかを、東京湾・大阪湾の湾奥～湾口泥を用いて調べた。湾内の各地点から採掘した表層泥について、底質有機物濃度(CODもしくはIL)とunit Lultとを比較したのが表-4である。表より、含有有機物濃度の増大に伴ってunit Lultも増加していることがわかる。kは、含有有機物濃度によりやや増減しているようである。大阪湾泥の場合、シルト分の多い有機底泥では、底質CODのうちの1～2割が第1段階酸化過程での酸素消費ポテンシャルとなっていることがわかる。

これらをまとめると、酸素消費式を次のように表わすことができる。

$$Y = \text{unit Lult} \cdot \text{SS} \cdot \{1 - \exp(-k \cdot t)\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{unit Lult} = 0.1 \sim 0.2 \times \text{COD} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$k = k_{20} \times \theta^{(T-20)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、SSはけん濁濃度(g/l)、 k_{20} は20°Cでの速度係数(約0.1/h)、 θ は温度定数、Tは水温(°C)である。

表-4 底質と消費ポテンシャルとの関係

sample		experimental condition		unit Lult	sediment contents					ratio	
site and station	temp.	number of bottles		(MEAN ± S.D.)	dry/wet	I.L.	COD	T-N	T-P	unit Lult / COD	unit Lult / I.L
Osaka Bay	9°C	n=2		1.72 ± 0.40	0.35	8.1	20.9	0.9	0.3	0.08	0.21
				5.53 ± 0.09	0.29	9.4	—	—	—	—	0.59
				1.90 ± 0.38	0.40	6.9	19.1	1.6	0.3	0.10	0.28
	20°C	n=2		2.90 ± 0.16	0.35	8.1	20.9	0.9	0.3	0.14	0.36
				9.24 ± 0.48	0.29	9.4	—	—	—	—	0.98
				1.95 ± 0.08	0.40	6.9	19.1	1.6	0.3	0.10	0.28
				1.13 ± 0.16	0.53	4.7	10	0.9	0.4	0.11	0.24
				3.27 ± 0.21	0.29	8.2	19	2.1	0.6	0.17	0.40
				0.28 ± 0.02	0.72	2.3	6.7	0.6	0.3	0.04	0.12
Tokyo Bay	20°C	n=1		5.8	0.19	9.5	—	3.2	0.8	—	0.61
				3.8	0.33	7.5	—	2.2	10.8	—	0.51
				5.0	0.17	10.6	—	3.7	16.8	—	0.47
				5.92 ± 0.32	0.17	10.2	—	4.1	8.8	—	0.58
				3.19 ± 0.09	0.24	8.9	—	—	7.2	—	0.36
				3.1	0.24	7.9	—	2.1	15.0	—	0.39

(2) unit Lultの特性

unit Lult 湾内分布を図-3に示す。大阪湾東部、東京湾ともに湾奥または河川影響海域で高い値を示している。

大阪湾奥底泥を、乱さぬようにコアサンプラーで採泥し、直上水と共に28℃嫌気状態で2週間静置後、各泥深毎に切り取りunit Lultを測定した。他の底質項目、間隙

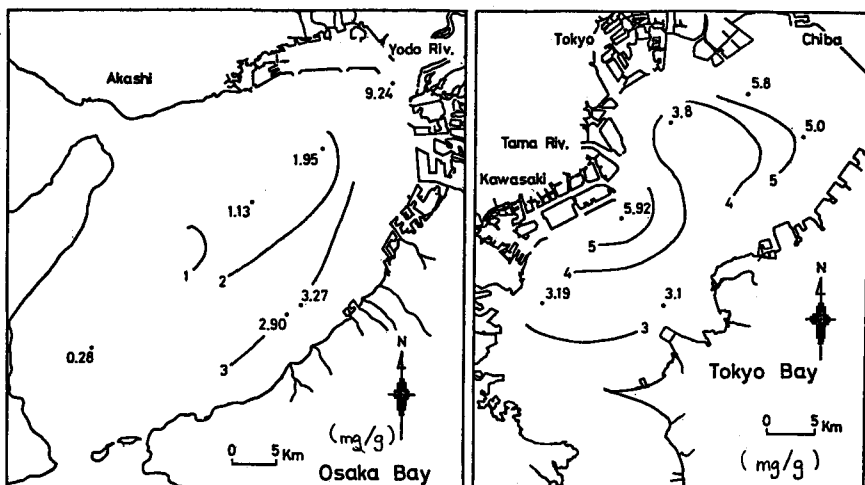


図-3 湾内分布図

水中のN、P濃度を含めて、鉛直分布を図-4に示した。unit Lultは、COD、硫化物などと同様に鉛直分布をもっており、表層で高く底層に向かって徐々に減少している傾向がうかがえる。unit Lultは、硫化物濃度と良い相関を示しており、有機物とくに蛋白質等の嫌気的分解の進行状況に対応して高い値を示していると思われる。

浮遊けん濁粒子の構成物質となる可能性がある新生堆積物・浮遊・山土(74μm以下径)につ

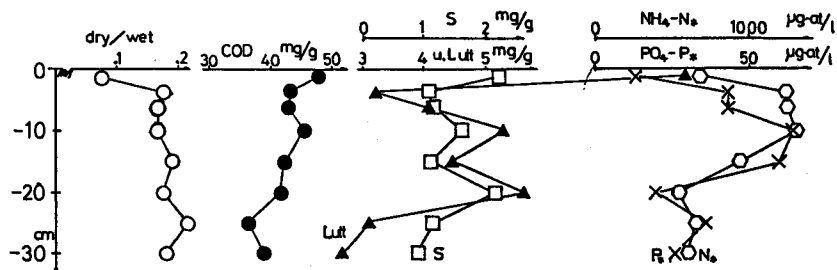


図-4 底泥内鉛直分布図

いて同じく実験を行なったところ、表-5のような結果を得た。

山土は、主として無機鉱物より成るためほとんど酸素を消費しない。底泥の表面に浮ぶ含水比の高い浮泥は底泥表層よりもやや低い値を示している。毎水中を沈降しつつある粒子を円筒状の捕集ビンによりトラップした新生堆積物は、若干のばらつきが見られたが高い値を示した。浮泥・新生堆積物ともに有機質に富み、COD(もしくはIL)としては高い値ではあるが、含有有機物の分解過程や分解過程における好気嫌気条件などによりunit Lultが変化を受けていると推察される。供試浮泥新生堆積物は、夏期のものである。

底質の酸素消費に関しては、中西ら

表-5 各種けん濁粒子の消費ポテンシャルの比較

土砂の種類	乾泥率	底質COD	unit Lult	unit Lult / COD
新生堆積物 底上4m深 (広島湾)	1.2 ^{mg/g}	100.2 ^{mg/g}	—	—
2m	2.1	85.9	45 ^{mg/g}	0.52
1m	3.6	79.9	31	0.39
浮泥 (広島湾)	0.144 ^{g/g}	48.8	2.1	0.04
浮泥 (大阪湾)	0.230	38.4	3.1	0.08
・ (太陽湾)	0.174	(IL = 9.93%)	5.5	—
底泥表層 (広島湾)	0.308	31.3	3.5	0.11
・ (広島湾)	0.318	22.1	—	—
風乾山土 T	1.00	<1	0.09	—
(74μmふるい 通過分) A	1.00	<1	0.04	—
M	1.00	16.2	0.06	0.00

のIOD試験、静置時の泥表面からの酸素消費フラックス ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{日}$) 測定試験なども重要な指標である。大阪湾・広島湾の底泥について IOD' との関係を調べると表-6 のようになった。IOD' 値と unit Lult とは、含水比の補正を行えば比較的良好な相関がありそうである。

unit Lult の値を用い、k を $0.1 (20^\circ\text{C})$ として算定した 1 時間後の酸素消費量 IOD (CAL.) の値は、実測 IOD 値に比して $1/5 \sim 1/7$ 程度の大きさとなる。この理由は明らかでないが、両試験法の底泥けん濁濃度の差などにも関係していると思われる。

コアサンプラーにより採掘した不攪乱泥試料を用いて測定した静置底泥の酸素消費フラックスと、けん濁条件下での unit Lult との関係は、東京湾については図-5 のようになる。有機質に富み腐敗した底泥は、静止時にも直上水の酸素をよく消費し、舞い上がった時にも大きな酸素消費をもたらすことがわかる。

5. まとめ

ワールブルグ型呼吸計の原理を応用した比較的大容量の呼吸計を用いて、再浮遊した底泥の酸素消費実験を行なった。浮遊底泥の酸素消費は、一次反応式で表わされる第 1 段階の消費過程と、0 次反応式で表わされる第 2 段階の過程とから成ることがわかった。水質への影響としては 第 1 段階の過程が重要であろう。この過程は、最終酸素消費量 (酸素消費ポテンシャル) と速度係数とにより記述できる。最終酸素消費量は、けん濁底泥濃度に比例し、底泥含有有機物量に左右されることがわかった。速度係数は、けん濁海水水温の指数式で表わされ、高温ほど速度が早くなる。従って有機物濃度の高い腐敗底泥が高温時に再浮遊すると、浮遊初期に大きな酸素消費が起きる。

また、最終酸素消費量は、含有有機物の嫌氣的分解の過程もしくは微生物学的分解活性を表示しているものと思われ、底泥をめぐる有機物の挙動に対し有効な解析指標の 1 つとなり得ることがわかった。

最後に、故南部 博一博士 (前国立公衆衛生院部長) よりこうした解析法について貴重な示唆を受けたことを記して、深く感謝いたします。

表-6 IOD' と消費ポテンシャルの比較

試料	酸化物	unit Lult	IOD(CAL.)	IOD(MEAS.)
	$\text{mgH}_2\text{S}/\text{g}$	mg/g	$\mu\text{g/g wet}$	$\mu\text{g/g wet}$
底泥表層 大阪湾	1.94	4.3	64	376
広島湾	1.42	3.5	107	462
大阪湾	1.62	4.0	126	617
浮泥 大阪湾	2.09	3.1	87	581

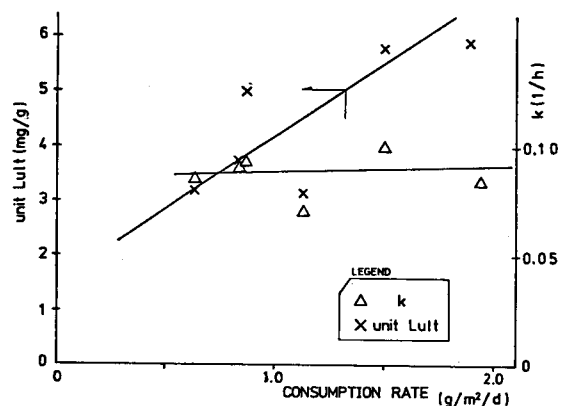


図-5 静置時消費フラックスと浮遊時消費量の関係

参考文献

- 1) 荻原耕一: BOD試験法解説、積文堂 (1964)
- 2) Burdick I, J. C.: Analysis of oxygen demand of sediments, Proc. Specialty Conf. on Dredging and its Environmental Effects, ASCE (1976)
- 3) 中西弘ら: 富栄養水域における底質評価に関する研究 (その3), 第16回衛工討論会 (1980)
- 4) HOSOKAWA, Y. et, al.: Oxygen Uptake by Resuspended Sediments,