

東京湾における底泥酸素消費と微生物群集構造の関係

Sediment Oxygen Consumption and Microbial Community Structure in Tokyo Bay

遠藤雅実¹・鯉渕幸生²・藤田昌史³・鈴木準平⁴
小倉久子⁵・飯村 晃⁶・大畑 聡⁷・磯部雅彦⁸

Masanori ENDO, Yukio KOIBUCHI, Masafumi FUJITA, Jumpei SUZUKI
Hisako OGURA, Akira IIMURA, Satoshi OHATA and Masahiko ISOBE

In order to elucidate a link between the sediment oxygen consumption (SOC) and the benthic environment, field observations of water quality and sediment environment were carried out during summer to autumn at 4 sites in the head of Tokyo Bay in 2009. SOC was observed by chamber methods after sampling by using fluorescent DO meter at a laboratory. The benthic environment was observed by a CN ratio and the quinine profile methods. Water quality on the seabed was also measured including DO, sulfide and nutrients at the same time. SOC was positively correlated with quinine concentrations. This correlation was the same level as water temperature, salinity and sulfide. From the long-term oxygen consumption experiments, influence of sediment microbial community was also confirmed.

1. はじめに

東京湾をはじめとする内湾では、長年にわたって富栄養化が問題となっている。これまでも水質汚濁防止法に基づいた水質総量規制により海域への流入負荷削減がなされ、個々の河川においても、水質浄化に関する施設整備やその他様々な取り組みが行われている。これらにより、流入負荷については一定の改善傾向にあるとされているが(二瓶ら, 2007), 内湾の水質の根本的な改善には至っていない現状にある。これには、過去に堆積した陸域由来の有機汚濁物質や、沈降・堆積した植物プランクトン等のデトリタスが、海底に蓄積・濃縮され、底質微生物群集によって分解・無機化される過程で溶出し、再び湾内の物質循環に回帰していることが一因として挙げられる。また微生物群集による底泥直上での有機物の分解・無機化の際の酸素消費により、貧酸素化が促進され、湾内の水質・生態系に様々な悪影響を与えている。内湾の富栄養化に関するこのような一連のプロセスに、微生物群集が深く関わっていることは、これまでも報告されているが(藤田ら, 2003), 微生物群集の量

や構造が、底泥の酸素消費に及ぼす影響については十分な知見が得られていない。そこで本研究では、東京湾における底泥酸素消費と微生物群集構造との関係を明らかにするため、水温、溶存酸素、栄養塩をはじめとする水質や底質微生物群集の観測、底泥の酸素消費実験を、東京湾の湾奥部の4地点で実施し、底泥の酸素消費に、水質や微生物群集がどの程度影響するかを検討した。

2. 観測方法

(1) 観測地点

現地観測は、図-1に示す東京湾中央(St.8)、湾奥部の浅瀬窪地内(St.99)、羽田沖(St.98)、海老川河口(St.E)の4地点において、2009年7月から2010年1月にかけて、月に1回の頻度で実施した。

(2) 観測内容

湾内のSt.8, St.99, St.98においては千葉県の実験船「きよすみ」に乗船し、船内に設置してあるバンドン採水器、多項目水質計等を用いて、各地点の表、中、底層

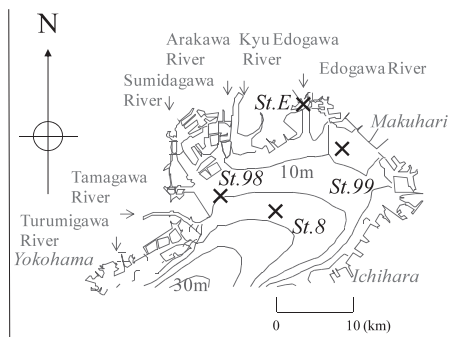


図-1 現地観測地点

1 学生会員	東京大学大学院新領域創成科学研究科 社会文化環境学専攻
2 正会員 博(工)	東京大学講師大学院新領域創成科学研究科
3 正会員 博(工)	茨城大学准教授工学部都市システム工学科
4	茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学科
5 正会員	千葉県環境研究センター水質環境研究室
6	千葉県環境研究センター水質環境研究室
7	千葉県水産総合研究センター東京湾漁業 研究所
8 フェロー 工博	東京大学教授大学院新領域創成科学研究科

に当たる水深で採水し、溶存酸素（以下、DO）や水温、塩分、栄養塩、硫化物等の水質観測を行った。同時に採取した柱状コアサンプルを用いて、実験室において酸素消費実験を実施した。柱状コアは内径5.5cm、高さ25cmの亚克力製のパイプを使用し、上下をシリコン製のふたにより密閉した。採泥厚は表層10cm程度とした。河口域であるSt.Eにおいては潜水作業により、同様の柱状コアによる採泥、海底直上水の採水、DOや水温、塩分、硫化物等の水質観測を行った。これら採取したサンプルは、水冷して速やかに実験室へ持ち帰り、後述する実験や分析を行った。

(3) 酸素消費実験

酸素消費速度定数（以下、SOC）を求めるため、酸素消費実験を行った。酸素消費実験の手法として大きくは、現地連続観測により行うものと室内実験によるものに分けられる。現地連続観測による手法は、近年測定機器の開発や手法の確立がなされたことにより、底質環境を攪乱せずにリアルタイムで測定できるため、より信頼性の高い結果が得られるとされ、全国各地で測定が行われている（桑江ら、2008；遠藤ら、2008）。一方の室内実験による手法は、柱状コアにより採取したものをを用いるもので、従来から用いられてきた手法である。本研究では同時期かつ湾内複数地点を対象としており、前者による手法の適用は難しいため、対象領域や実験の容易さから後者の室内実験を行った。従来からの室内実験法については、入江ら（2007）が、採取本数や採泥厚、現地観測値と室内実験値を比較すること等により、最適なサンプリング法や現地観測と大きな差異がないことを検証している。

酸素消費実験装置の概要を図-2に示す。実験室に持ち帰った各地点複数本のコアサンプルの直上水を、底泥を乱さないようにして飽和した人工海水に入れ替え、攪拌機により海水を攪拌し、蛍光式DO計（Presens社、Fibox3-AOT）によりコア内のDOを消費し尽くすまでDOの変化を測定した。現場環境により近い状態を再現するため、観測時の塩分、水温を用いて実験を行った。また同時に図-2の右側に示すようにコアにチューブを接続して、DOを消費し尽くした後で、ポンプで酸素が飽和した人工海水を供給し、繰り返し曝気できるようにして、蛍光式DO計（HACH社、HQ40d18）をコア内に固定し、15分毎に測定を行い、これを一ヶ月程度の長期に渡って継続した（以後この実験を観測当日の酸素消費実験との対比で長期実験と呼ぶ）。このような長期実験時のDOの時系列の一例を図-3に示す。DO消費は当初緩やかであったが、徐々に増加していくことがわかる。

(4) キノンプロファイル法

底泥表層の微生物量や微生物群集構造のSOCへの寄与を明らかにするため、底泥直上での分解・無機化の作用

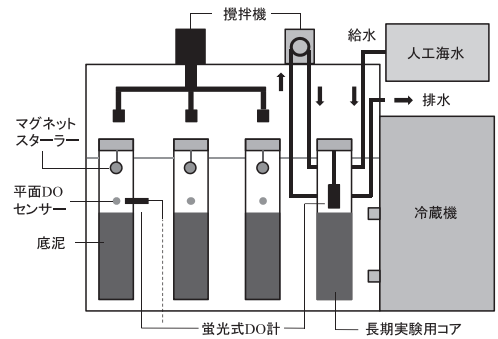


図-2 酸素消費実験装置概要

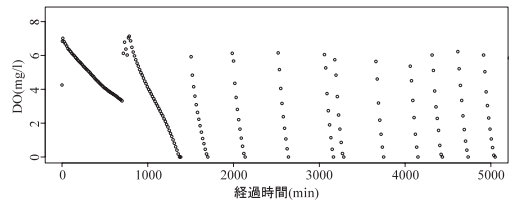


図-3 長期酸素消費実験におけるDO時系列例（st.99）

が影響すると考えられる底泥表面における泥（表面5mm）を採取し、キノンプロファイル法により、泥中内のキノン含有量とキノン構成比を求めた。ここで呼吸鎖キノン（以下、キノン）とは、細菌の電子伝達において水素キャリアーとして機能する補酵素である。一般的に、一細菌種は一種類の優先キノン種を持っており、好気呼吸に係わるユビキノ（以下、UQ-n）と嫌気呼吸に係わるメナキノ（以下、MK-n）に大別できることから、微生物の群集構造が把握できる。優先キノン種は、環境条件に応じて変化することがなく、遺伝的にも安定していることが知られている。化学分析により95%以上の収率で回収でき、微生物量あたりの含有率がほぼ一定なため、キノン含有量の変化を微生物量の変化と見なすことが可能である（Hiraishiら、1989）。採取した底質試料は、凍結乾燥処理後、乾燥重量を測定した。その後、キノンを含む脂溶性成分を抽出するために、クロロホルム・メタノール（2:1, v/v）とヘキサンを順次用いた。得られた溶媒抽出物を固相抽出カートリッジ（Waters社、Sep-Pak@Silica）に吸着させ、2%（v/v）のジエチルエーテル・ヘキサン溶液を用いてメナキノンを、10%（v/v）の同溶液を用いてユビキノンをそれぞれ分離・精製した。アセトンに溶媒置換した後、高速液体クロマトグラフィー（島津製作所、SCL-10A VP）により、各キノン分子種を分離・定量した。検出器は、フォトダイオードアレイ（島津製作所、SPD-M10A VP）を用いた。各キノン種の同定には、吸光スペクトルやENIU値（Hiraishiら、1989）を参考にした。底質試料のキノン含有量は、試料

の凍結乾燥後の乾燥重量に対するものとした。これら一連の分析手順は、藤田ら (2008) に従った。

3. 観測結果

(1) 現地現況

海上保安庁により連続観測された、観測期間中の千葉灯標における水温とDOの時系列を図-4に、湾内の各地点におけるDOの鉛直プロファイルを図-5に示す。底層の貧酸素化は、観測を開始した7月にはすでに発生しており、湾中央のSt.8では10月に、密度成層期の終了に伴い解消した。一方、浚渫窪地のSt.99では貧酸素化が12月まで継続した。図-6に海底直上における全リン (以下、T-P) とオルトリン酸態リン (以下、PO₄-P) を示す。St.99ではT-Pの90%以上がPO₄-Pであったことから、デトリタスの分解や溶出由来と推測される。一方、湾中央のSt.8ではSt.99と比較して、TPに占めるPO₄-Pの割合が低いことが分かる。同様にSt.98においては、両者の中間的な挙動であった。底泥表面における有機態炭素 (以下、TOC) と有機態窒素 (以下、TON) 及びそれらのC/Nを図-7に示す。有機物は河口部ということからst.Eが最も高い値をとっていたが、湾内ではst.8で最も高かった。st.99は窪地であり、鉛直混合が弱いことより最も低く、st.98については中間的な挙動であった。

(2) 酸素消費速度定数 (SOC)

酸素消費実験により得られたDO時系列が、一次反応

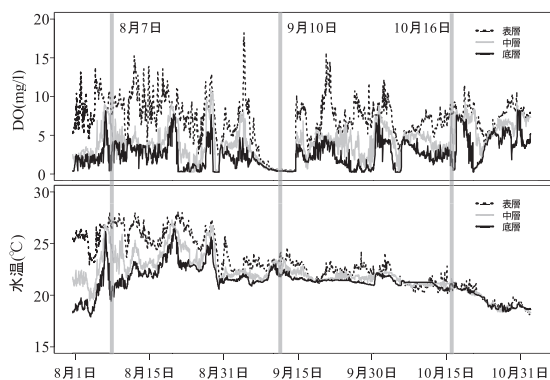


図-4 DO (上) と水温 (下) の時系列

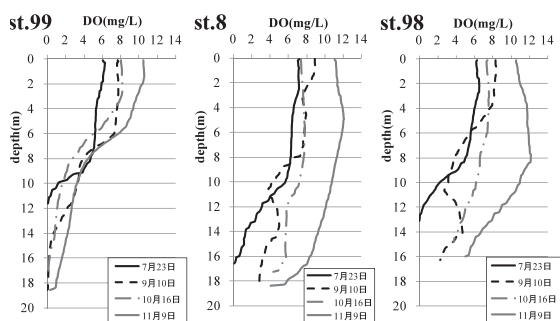


図-5 DOの鉛直分布

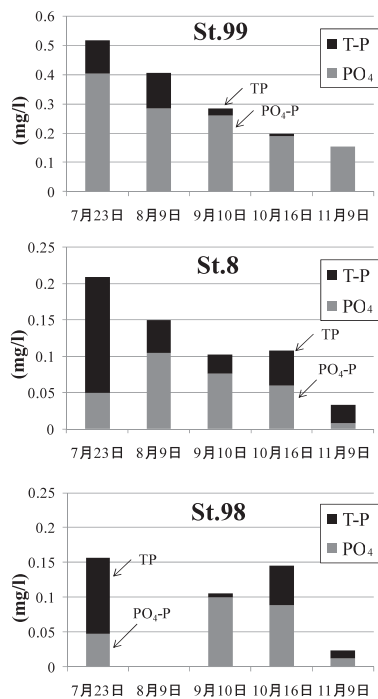


図-6 海底直上のTP, PO₄-Pの濃度

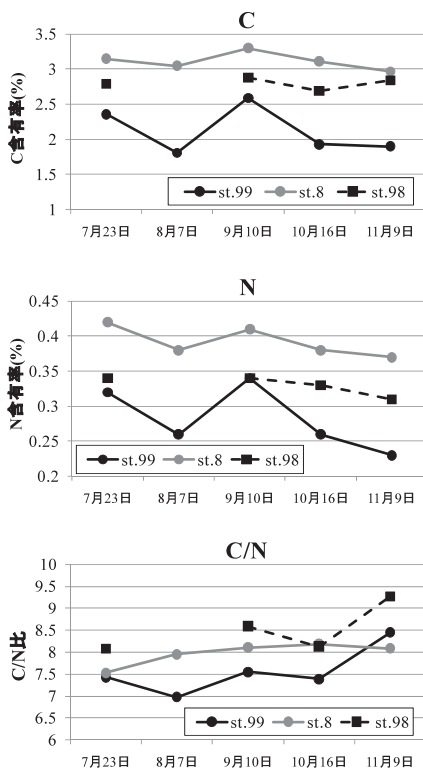


図-7 底泥表面のTOCとTON

であったため、指数近似をすることにより、各地点におけるSOC (1/min) を算出した。算出したSOCの平均値をとり、それらの時間変化を図-8に示す。

SOCはSt.8とSt.99で同様の傾向を示し、8月に最大値をとり、減少した後、10月下旬に再び増加した。更に図-9には、長期間の実験により得られた、SOCの長期変化を示している。St.99の11月分の実験結果については、コアを乱してしまい、値が安定しなかったため、図から除外をしている。

東野ら(1997)が行った酸素消費の基礎実験によると、実験開始後数時間から数日でDOが急減し、その後は緩やかに減少し、最後には濃度がほとんど変化しない状態へと推移するとされている。これは好気的環境が続いている場合、底泥表面のごく薄い層のみが好気性に保たれ酸化層を形成し、これによりDO消費物質の上層水中への溶出、拡散が抑制されることや、DO消費物質が分解され減少するためと考えられている。従って一般的にはSOCは初期に比較的大きく、徐々に減少する。また長期実験を継続することで底泥表面にひび割れが生じ、DO消費物質が溶出、拡散するため、ひび割れが生じるとDO消費が再び促進されると報告されている(東野ら, 1997)。一方、本実験においては、SOCは実験開始の4日程度後に最大値となり、その後減少した。東野ら(1997)の結果では、DO消費がほとんどない状態へと推移していたが、本実験での酸素消費は継続していた。これは底泥中に有機物が多く含有しているため、一ヶ月実験を継続しても、微生物に分解され尽くされることがなかったためと考えられる。

(3) キノン含有量とキノン構成比の時間変化

図-10に同時期の底泥表面のキノン含有量を示す。この図よりSt.8におけるUQ(UQ-8, UQ-9)が酸素の解消と伴に急増し、St.99ではMKが支配的であることが分かる。St.Eでは9月3日の観測時にUQは減少し、MKが増加しているが、青潮の発生と対応しているとみられる。

(4) 酸素消費速度定数(SOC)と各水質項目の相関

各水質項目の酸素消費への寄与を示すため、全測点におけるSOCと各水質項目の相関を表-1に示す。この表からSOCとUQの間には正の相関が見られ、好気的微生物群集の増加とSOCの増加が、水温、塩分、DOよりもよく対応することがわかる。これは底泥のSOCが、従来考えられてきた水温やDOに加えて、微生物の量や質の影響を受けて変動することを意味する。表-2にSOCと各UQとの相関を示す。UQの中でもUQ-10は相関が0.655と最も高く、SOCに大きく寄与していた。逆にキノン急増とSOCが対応しない場合もあり、更に観測結果の蓄積が必要であるものの、底泥酸素消費と微生物群集の関係が確認できた。またSOCとDOの相関が低く出ているの

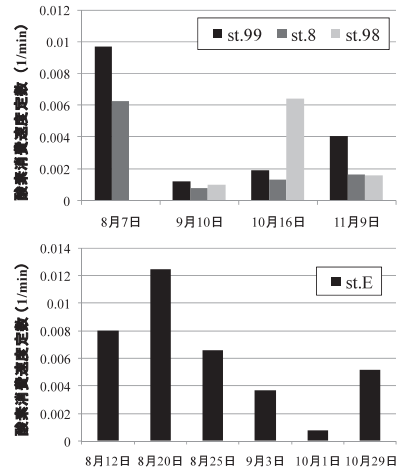


図-8 酸素消費速度定数(SOC)の時間

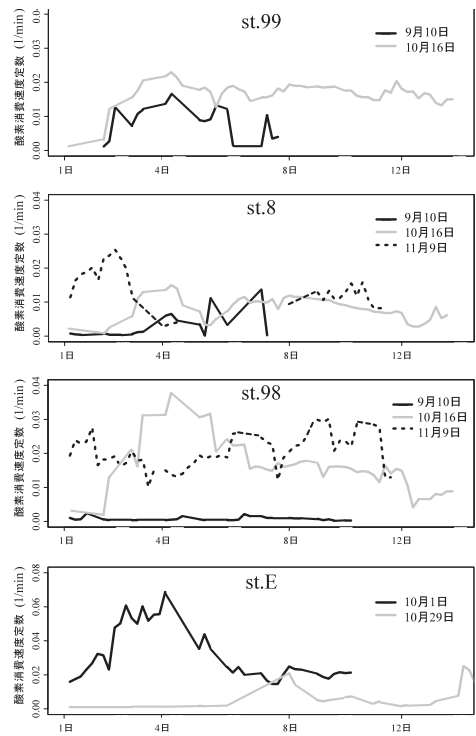


図-9 酸素消費速度定数(SOC)の長期変化

は、夏季の湾内の底層が無酸素化した状態であったことや、河口部のDOが日内にも変化し、観測時の代表性が低いとみられる。

(5) 酸素消費速度定数(SOC)と微生物群集

このようにSOCが微生物の量や質の影響を受けて変動するという事実は、湾内の物質循環に重要となる底泥酸素消費の算定に、従来用いられてきた水温やDOの関数のみでは不十分で、微生物群集影響を考慮する必要があることを意味している。特に湾奥部において、DOは4月

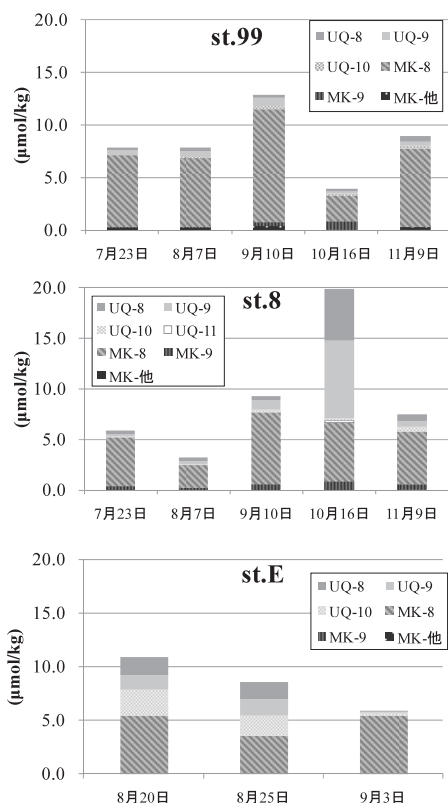


図-10 キノン含有量の時間変化

から10月まではほぼ0mg/lとなり、混合期に急増するので、SOCとの対応は小さい。また河口部では一日の中で貧酸素から過飽和まで急激な変化をするため、採取時のDOとSOCが必ずしも対応しないことは十分起こり得る。一方キノンは、上記のような水質変化の履歴を長期間積分した結果を表しているため、SOCと対応が良いと考えられる。SOCの長期実験から、底泥直上の水質が嫌気条件から好気条件に急変した場合、微生物が十分増加する4日程度の時間を経てSOCが大きくなったが、この結果はDOが急激に変化する際にSOCとの対応が悪くなるという上記の結果と一致している。

4. まとめ

本研究では、東京湾における酸素消費と微生物群集構造や量との関係を明らかにするため、水質や微生物群集の観測、底泥の酸素消費実験を実施した。その結果、酸素消費速度定数 (SOC) とUQ (特にUQ-10) に正の相関が認められ、水温や塩分等の水質項目同様の寄与があり、底泥酸素消費と微生物群集との関係が確認された。同様の結果は長期の酸素消費実験でも確認され、酸素消費予測モデルを用いる際に、従来の水温やDOの関数のみでは不十分で、それらの履歴を反映する微生物群集を考慮

表-1 酸素消費速度定数 (SOC) とキノンの相関

	SOC	水温	塩分	DO	硫化物	Quinone	UQ	MK
SOC	1	0.400	-0.620(*)	0.066	-0.212	0.215	.634(*)	-0.143
水温		1	-.880(**)	0.069	-0.346	-0.151	.763(**)	-.613(*)
塩分			1	0.119	0.195	0.084	-.777(**)	.555(*)
DO				1	-0.343	0.000	0.344	-0.208
硫化物					1	0.046	0.214	-0.094
Quinone						1	0.303	.816(**)
UQ							1	-0.303
MK								1

表-2 酸素消費速度定数 (SOC) と各UQの相関

	UQ		
	UQ-8	UQ-9	UQ-10
SOC	0.014	0.232	0.655

する方法が有望とみられ、今後更に観測結果を蓄積し、検証していく必要がある。

参考文献

- 入江政安・窪田勇輝・中辻啓二・西田修三 (2007) : 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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1026-1030.
- 遠藤 徹・水田圭亮・重松孝昌 (2008) : 貧酸素化した港湾海域における底質の酸素消費特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第55巻 (2008), pp.1066-1070.
- 桑江朝比呂・中川康之・三好英一 (2008) : 海底境界面における酸素消費速度-渦相関法による現地連続観測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1001-1005.
- 鯉淵幸生・藤田昌史・阿部哲也・磯部雅彦 (2005) : 有明海奥部の底生微生物群集構造に及ぼす物理環境の影響, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.946-950.
- 相馬明郎・桑江朝比呂・関口泰之・中村由行 (2009) : 干潟・浅海域における酸素の生成・消費メカニズム-生態系モデルによる解析-, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.1146-1150.
- 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, 土木学会論文集, No.663/II-53, pp.109-117.
- 二瓶泰雄・江原圭介・白田美穂・坂井文子・重田京介 (2007) : 江戸川・荒川・多摩川における水質環境と流入負荷特性, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1226-1230.
- 東野 誠・神田 徹 (1997) : 底泥による静水中での溶存酸素消費に関する基礎実験, 水工学論文集, 第41巻, pp.439-444.
- 藤田昌史・今井健太郎・辻 幸志・坂本 康 (2008) : 一般廃棄物最終処分場における浸出水中のキノンバイオマーカーの動態, 廃棄物学会論文誌, 第19巻, 第5号, pp. 347-351.
- 藤田昌史・鯉淵幸生・Udin HASANUDIN・小倉久子・藤江幸一・磯部雅彦 (2003) : 東京湾における水質動態と底質微生物群集構造の解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 996-1000.
- Hiraishi,A., K.Masamune and H.Kitamura (1989) : Characterization of the bacterial population structure in an anaerobic activated sludge system on the basis of respiratory quinone profiles, Applied and Environmental Microbiology, Vol.55, NO.4, pp. 897-901.