

原 著

広島湾の貧酸素水塊の分布とその形成機構

伊達 悦二, 清木 徹*

The distribution and formation of an oxygen-deficient water mass in Hiroshima Bay

ETUJI DATE and TOHRU SEIKI*

(Received Oct. 18, 2006)

Our research examines the formation of an oxygen-deficient water mass in Hiroshima Bay, using data recorded in the 1990-2001 fiscal year. The data indicates the presence of an oxygen-deficient water mass in July, and documents a remarkable expansion of this mass by August and September. The range of the oxygen-deficient water mass by this time spans the distance between Miyajima and Ninoshima, located five kilometers from the coastal area.

We identified density stratification, the influence of ocean water, oxygen consumption, and the amount of organic matter in the water, as the factors contributing to the formation of the oxygen-deficient water mass. As a result, we were able to conclude that the oxygen-deficient water mass occurred due to the factors as stated above, and as follows:

(1) An influx of the river around July caused a decline of salinity on the surface layer of the water and a concurrent rise in the water temperature, subsequently increasing the density stratification in the water. This produced the oxygen-deficient water mass.

(2) The oxygen-deficient water mass increased between July and August, aided by the topography of the bay, which naturally restricts inflow of ocean water and oxygen to the coastal area.

(3) A rise in temperature on the bottom layer of water, and a large amount of organic matter on the surface, promoted the proliferation of active bacteria from August to September; thus resulting in an increase of oxygen consumption.

Key words: oxygen-deficient water mass, oxygen consumption, organic matter, eutrophication, Hiroshima Bay.

1 はじめに

広島湾ではCODの環境基準達成率は1974年に類型指定を受けて以来, 低水準にあり, 湾全体では約30%, 湾奥ではほぼ0%である[1]. これは, 富栄養化による有機物の内部生産が原因と考えられる[2]. 生産された有機物は底層あるいは底泥に蓄積し, 微生物分解による酸素消費が起こり, いわゆる貧酸素水塊が発生する. 東京湾では貧酸素水塊に起因する青潮による漁業被害が発生[3]し, 伊勢湾[4]や大阪湾[5]でも貧酸素水塊が発生している. 貧酸素水塊の発生は, 底生動物の生息に悪影響を与えるほか, 底泥からの栄養塩類の溶出による二次汚染を招くことから, その発生状況等を把握することは貧酸素化対策を行う上でも重要である. 特に広島湾の奥部は閉鎖性水域であり, 夏季には底層で貧酸素水塊が恒常的に発生している.

ここでは, 過去11年間のデータから広島湾の貧酸素水

塊の発生状況, 形成要因および形成機構について検討した.

2 調査方法

調査は1990~2001年度(1998年度を除く)の11年間行った. 調査頻度は調査年度により異なるが, 各年度とも水塊が安定し始める夏季から水塊の上下混合が起こる秋あるいは冬まで行った. 調査地点はFig. 1に示す11地点で, 平均水深は約17mである.

測定項目は水質については水温, 溶存酸素(DO), 塩分, 栄養塩類(無機態窒素=DIN, 無機態リン=DIP, 総窒素=TN, 総リン=TP), 総有機炭素(TOC), 溶存態有機炭素(DOC), 懸濁態有機炭素(POC)である. 水温, DO, 塩分はアレック電子社製の水質多項目測定器ADR-1000を用い, 表層(0m)から水深10mまでは1mごと, 10m以深は5mごとに測定し, 底層付近は底泥から0.5,

*茨城大学教育学部環境科学研究室: Department of Environmental Science, Faculty of Education, Ibaraki University

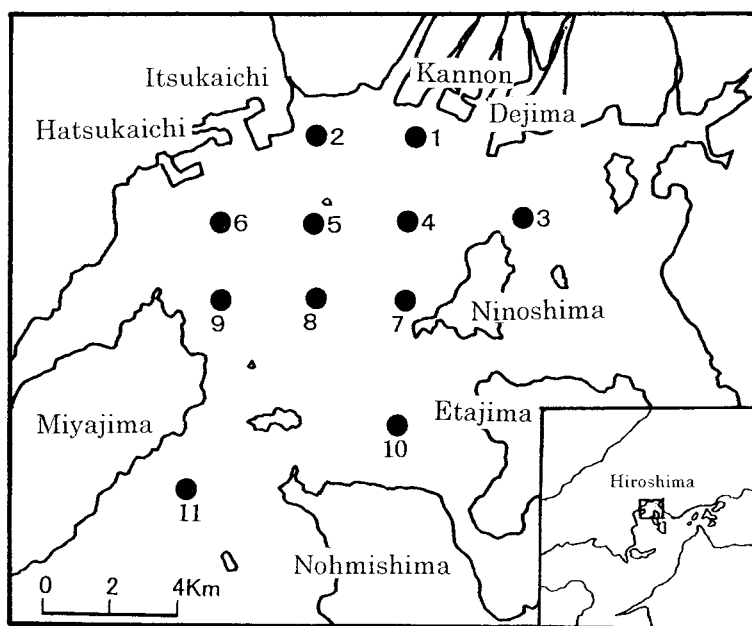


Fig. 1 Location of the sampling sites in Hiroshima bay

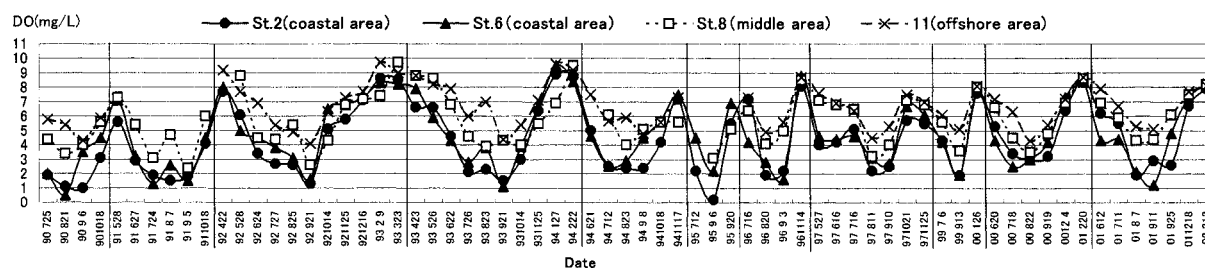


Fig. 2 The monthly of oxygen-deficient water mass at the layer

1, 2 m上を測定した。栄養塩類は表層, 中層, 底層 (底上 1 m = B-1m) についてバンドーン採水器で採水し, ろ紙GF/Cでろ過後, DIN, DIPはブラン・ルーベ社のオートアナライザー TRAACS-2000で測定した。TNは柳本製微量窒素分析装置TN-7型で, TOC, DOCは島津全有機炭素計TOC-500で, TPは環境省告示59号によりそれぞれ測定した。POCは $POC = TOC - DOC$ として求めた。底質についてはエックマンバージ型採泥器を用いて採泥し, 表層 1 cmの泥を試料として測定した。硫化物, 含水率, IL (強熱減量) は底質調査方法[6]により, TOC, TNは柳本製CHNコーダMT-3により, TPはIL法により測定し, ORPは堀場製pHメータD-14により現場で表層0.5 cmの部位を測定した。底層水の酸素消費速度 (Water Oxygen Demand=WOD) は現場底層水 (B-1m) を持ち帰り, 100mLDO瓶に入れ, 現場水温に設定し, 数日間インキュベートし, その間のDO濃度の変化から求めた。底泥酸素消費速度 (Sediment Oxygen Demand=SOD) は離合社製不攪乱採泥器HR型で採取した柱状泥を径105mm, 高さ180mmのアクリル容器に直上水ごと攪乱状態で移

し, オーシャノグラフィー製E/BODで測定した。E/BOD装置は底泥により消費された酸素量をスイッチ電極で検知し, 消費された酸素量だけを電気分解を行って酸素を供給するシステムになっている。測定は現場温度に設定し, 約2週間インキュベートし, 積算消費量をブランク補正してSODを求めた。

3 結果と考察

3.1 貧酸素水塊の発生状況

貧酸素水塊とは水中の溶存酸素が低下した水の塊りをさすが, ここではほとんどの生物種の生存に悪影響を及ぼすとされる酸素濃度 3 mg/L以下 (溶存酸素飽和率約 50%以下) の水質を貧酸素水塊と呼ぶこととする。なお, St. 1~6を含む水域を沿岸域, St. 7~10を中間域, St. 11を沖合域と呼ぶこととして議論した。

Fig. 2に代表的な地点として沿岸域のSt. 2, St. 6, 中間域のSt. 8および沖合域のSt. 11における底層のDO濃度の推移を示す。

Fig. 2から貧酸素水塊の発生は沿岸域の地点で顕著であることが分かる。発生期間は概ね7～9月である。その消長を見ると7月頃から発生し始め、しだいに規模を拡大しながら8、9月ころ最も顕著となり、10月以降解消されるという現象が毎年繰り返されている。DO濃度が1 mg/Lを下回る顕著な貧酸素水塊は沿岸域のSt. 2の1995年9月6日に0.2mg/L, St. 6の1990年8月21日に0.5 mg/Lであった。中間域ではほとんど貧酸素水塊は見られず、沖合域では全く発生していない。ついで、Fig. 3に各年度の最も貧酸素水塊が顕著に分布した時期（8月あるいは9月）の水平分布を示す。

図から貧酸素水塊の発生範囲は年度により異なるが、概ね廿日市地先から出島地先にかけての沿岸から宮島の

北端と似島の北端とを結ぶ線まで約5 kmの範囲（ここでいう沿岸域）が貧酸素水塊の発生域と考えられる。中でも五日市市地先から出島地先の沿岸部一帯は1 mg/L以下となる顕著な貧酸素水塊の発生水域となっている。

3.2 貧酸素水塊発生水域の海域環境

3.2.1 底泥環境

Table 1にSt. 2, St. 8, St. 11の3地点における底質項目の平均値を示す。

表からSt. 2では有機物の指標であるIL, TOC濃度や硫化物濃度が高く、ORPも負になるなど底質の汚れが顕著である。Fig. 4は上記3地点の底質項目の推移を示したもので、硫化物についてはSt. 2では1992年8月25日に最

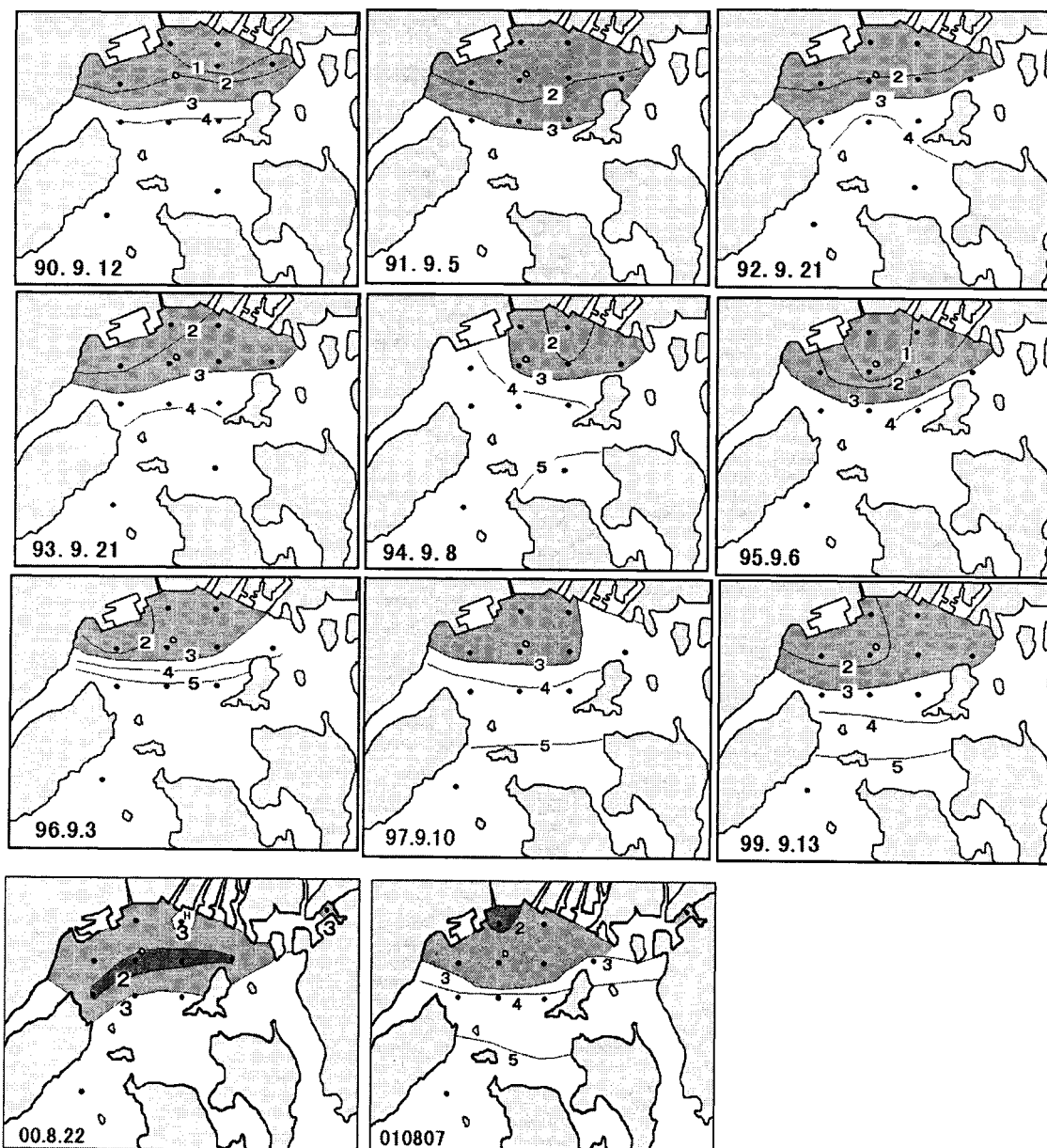


Fig. 3 The horizontal distribution of oxygen-deficient water mass (Unit mg/L)

Table 1 The characteristics of sediment in the 1992-2000 fiscal year

Locations	Sulfide mg/g	IL %	Water content %	ORP mV	TOC mg/g	TN mg/g	TP mg/g
St. 2	0.28	14.9	73.8	-66	27.2	2.37	0.73
St. 8	0.05	13.6	76.8	69	24.2	2.46	0.69
St. 11	0.08	13.5	76.8	84	24.0	2.46	0.66

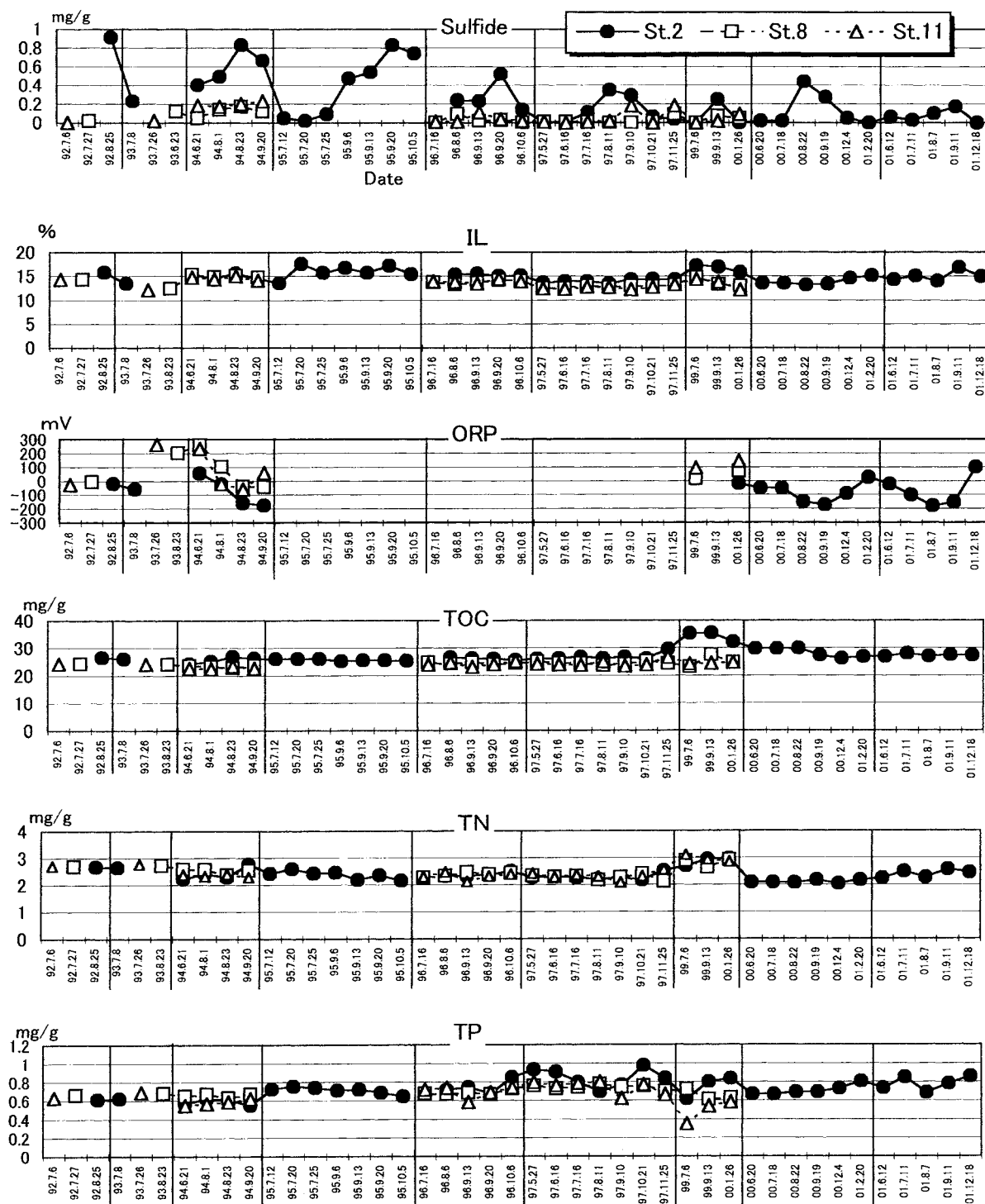


Fig. 4 The monthly variation of the characteristics of sediment in Hiroshima Bay

大の0.91mg/gを示すなど7～9月の夏季に濃度の増加が著しい。

ORPはSt. 2ではほぼ年間通して0mV以下になり、特に7～9月は顕著な嫌気的環境を示した。有機物指標であるIL, TOCもSt. 2が他の2地点に比べ高い濃度推移しており、St. 2ではTOCが1999年7月6日と9月13日にそれぞれ約35mg/gの高濃度を示した。栄養塩類ではTNについては地点の違いは見られなかったが、TPはSt. 2が他の地点に比べやや高い濃度で推移している。1996年9月3日のTOCの水平分布 (Fig. 5) を見ると、五日市地先から出島地先にかけて26mg/g以上の値を示し、沿岸域での有機物負荷が大きいことを示した。

以上のことから貧酸素水塊の発生域では底泥の汚れが

顕著であり、また、貧酸素水塊の発生分布状況と底泥の有機汚濁関連項目 (IL, TOC, 硫化物) との分布はよく対応しており、両者の間に密接な関係のあることが推察された。

3.2.2 底層栄養塩類

底層の栄養塩類濃度は夏季には水中懸濁有機物の分解による回帰あるいは底泥からの溶出により高濃度に蓄積される傾向にあり、富栄養化を促進する要素や赤潮発生の原因あるいは植物プランクトンによる一次生産を支える因子となり、その動態については注目する必要がある。

Fig. 6にSt. 2, St. 8, St. 11の底層 (B-1m) におけるDIN濃度の推移を示す。

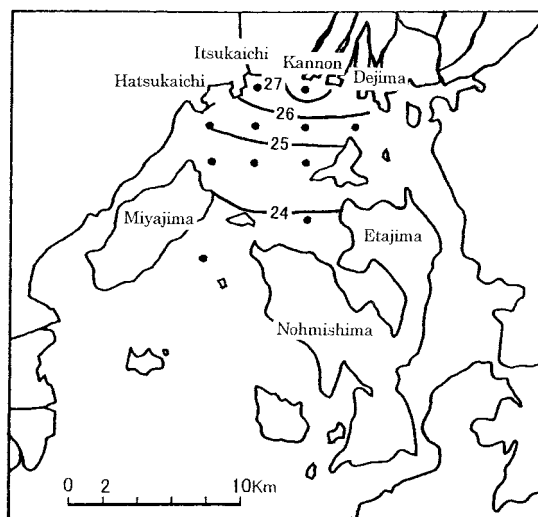


Fig. 5 Distribution of the concentration of TOC in sediment on 1996. 9. 3
unit: $\mu\text{g/L}$

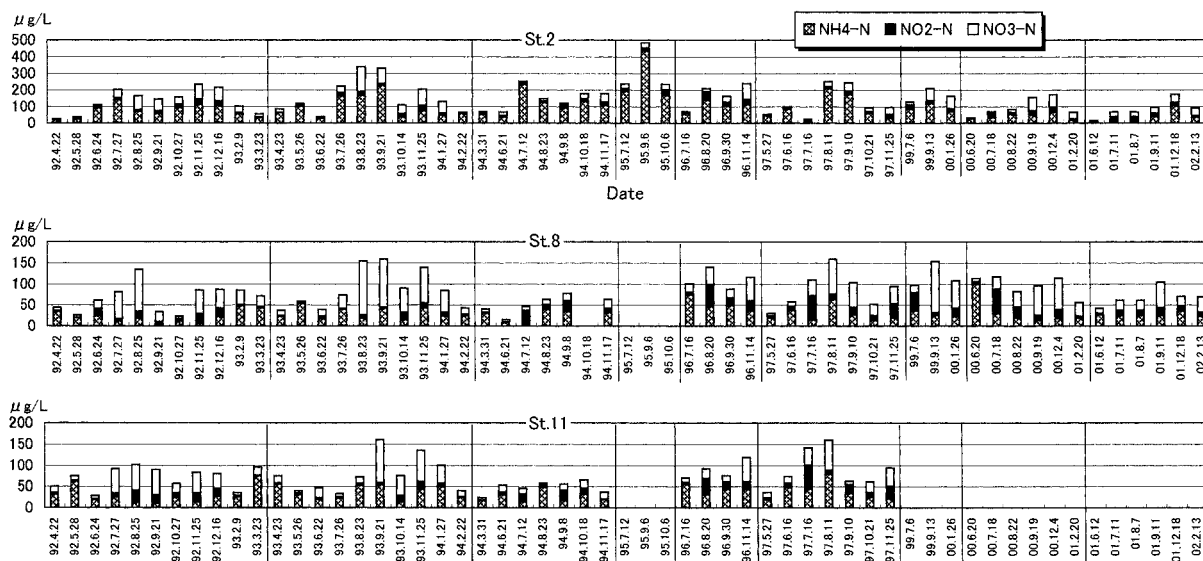


Fig.6 The monthly variation of DIN at the bottom layer in Hiroshima Bay

St. 2では150 $\mu\text{g/L}$ 以上の濃度が見られるのに対しSt. 8, 11では150 $\mu\text{g/L}$ を越えることはほとんどなく、沿岸域と中間域、沖合域とでは明らかに濃度レベルが異なることが認められた。一方、アンモニア態窒素の推移を見ると、St. 2では7~9月に増加する様子が伺える。アンモニア態窒素のDINに占める割合を見るとSt. 2では、平均で60%を占め、St. 8とSt. 11では38%, 46%と沿岸域に比べ小さく、沿岸域での構成比率の高いことを示した。

Fig. 7に底層におけるDIP濃度の推移を示す。DINと同様沿岸域と沖合域では濃度レベルの明らかな違いが見られる。

St. 2では40 $\mu\text{g/L}$ 以上の濃度を示すことが多いが、St. 8, 11ではほとんど30 $\mu\text{g/L}$ 以下で推移している。季節的に見ると概ね7, 8, 9月に高く、1995年9月6日にはSt. 2で120 $\mu\text{g/L}$ の高濃度を示した。

Fig. 8, 9は1997年9月10日の底層におけるDINとDIPの水平分布を示したもので、DINについては廿日市から観音の沿岸部で200 $\mu\text{g/L}$ を越える高濃度域が、DIPでは五日市地先で80 $\mu\text{g/L}$ を越える高濃度域が見られた。

これらの分布の特徴はFig. 3の貧酸素水塊の分布状況と呼応していることが認められた。

上記の結果から底層の栄養塩類の動態を見ると貧酸素

水塊の分布と発生時期(7~9月)とよく一致しており、沿岸域では貧酸素水塊の発生時期に底泥から栄養塩類が溶出している様子が伺えた。特にSt. 2では底泥が嫌気的環境になっており、アンモニア態窒素やDIPの溶出が著しいことを示した。

3.3 貧酸素水塊の形成要因およびその形成機構

3.3.1 成層強度

沿岸域では夏季、表層の水温上昇や河川水の流入による濃度低下のため、密度成層が形成される。この密度成層の形成は上層から底層へのDOの供給を妨げる要因となる。ここでは、表層(水深0m)と底層(B-1m)の密度の差を成層強度($\Delta\sigma_t$)として密度成層と貧酸素化との関連を検討した。なお、密度は水温と塩分の実測値を用いてクヌーッセンの方法により求めた[7]。

Fig. 10は各水域における成層強度と底層DO濃度の推移を見たものである。

これらのデータは調査期間における各月の平均値で示した。成層強度の推移を見ると、各水域とも7月に最も強くなるが、以降次第に弱くなり、11月には $\Delta\sigma_t$ 値は1以下となる。沿岸域では7月には $\Delta\sigma_t$ 値が約14となり、この時期河川水の流入による塩分低下や水温上昇により

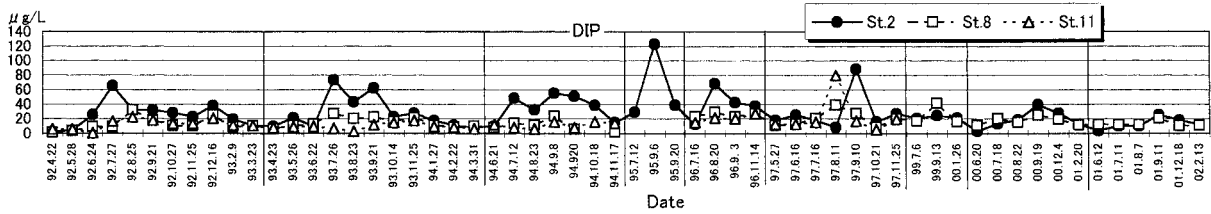


Fig. 7 The monthly variation of DIP at the bottom layer in Hiroshima Bay

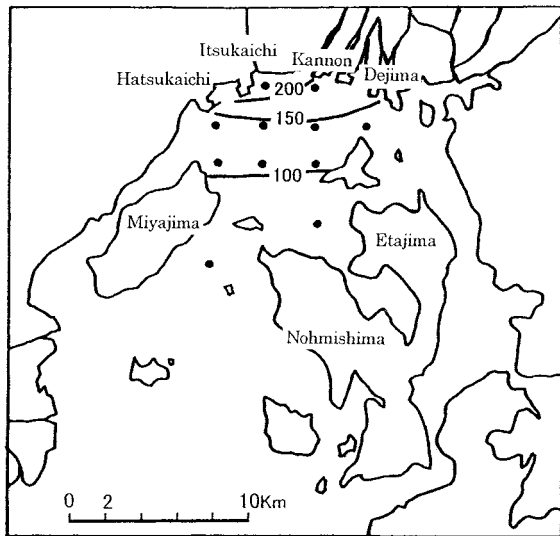


Fig. 8 Distribution of the concentration of DIN at bottom layer on 1997. 9. 10 unit: $\mu\text{g/L}$

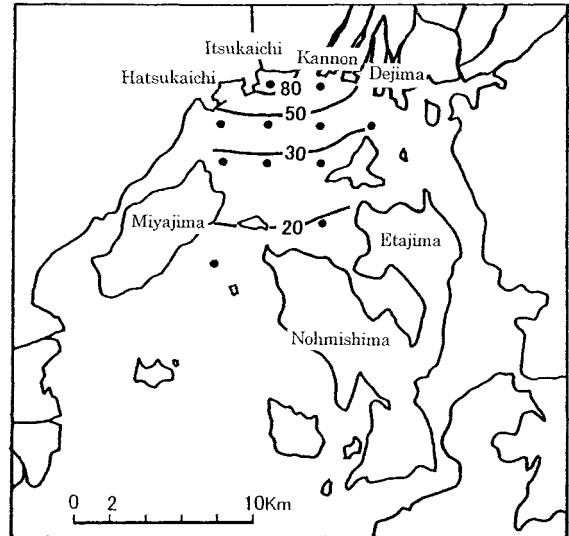


Fig. 9 Distribution of the concentration of DIP at bottom layer on 1997. 9. 10 unit: $\mu\text{g/L}$

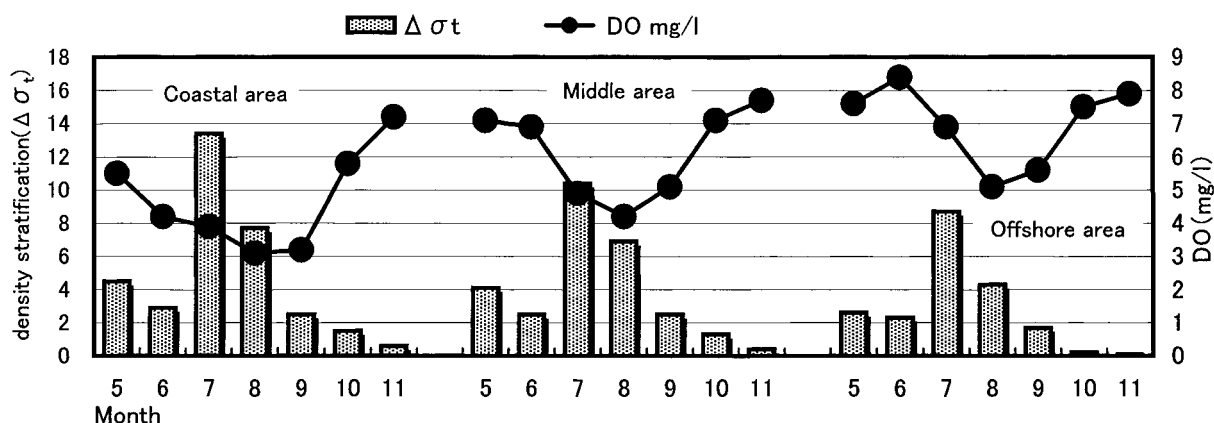


Fig. 10 The monthly variation of the intensity of density stratification and the concentration of DO

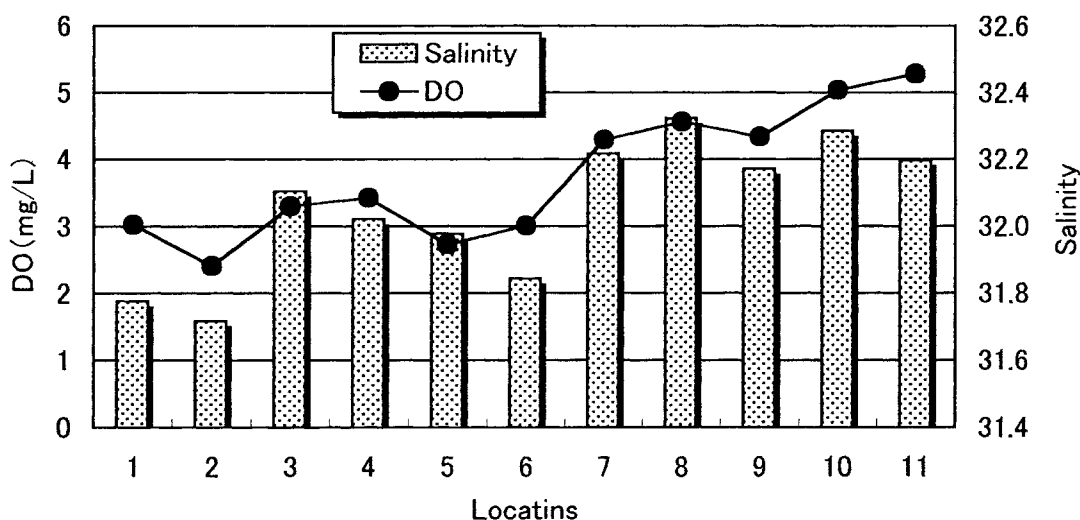


Fig. 11 The comparison among location of DO and salinity in the period when oxygen-deficient water mass occurred

成層強度が他の水域に比べ顕著に強いことを示した。一方、DO濃度の推移を見ると、各水域とも5月から8月にかけて低下し、以降11月にかけて回復する傾向を示した。しかし、沿岸域では9月も引続きDO濃度の低下が維持されていた。沿岸域の推移を見ると成層強度の最も強くなる7月にはまだ貧酸素化が進行中であり、成層強度がやや弱まる9月頃に貧酸素化が顕著となるなど両者の推移の間には時間的なズレが見られる。これは底層水温が9月頃に約24℃と年間で最も高くなる時期であり、微生物の活動による酸素消費とも関与していると考えられた。

3.3.2 外洋水の影響

外洋水は湾内へのDOを補給する役割がある。3.1の項で述べたように貧酸素水塊の発生が沿岸域で顕著となり、中間域や沖合域ではほとんどあるいは全く発生しないこと示した。その理由を底層塩分に着目して外洋水の流入と貧酸素水塊形成との関連から検討した。Fig. 11は

貧酸素水塊の顕著な発生時期（8、9月の平均）における底層塩分とDO濃度の地点別の比較を行ったものである。

Fig. 11から外洋に最も近い沖合域のSt. 11は塩分32.2でDO濃度は5 mg/Lを越えるが、沿岸域のSt. 1~6では沖合域に比べ塩分は低く、DO濃度は3 mg/L前後に低下している。特に、五日市、廿日市地先のSt. 1, 2では塩分が31.8以下となり、DO濃度も3 mg/L以下となる現象が見られる。Fig. 12は両者の関係を示したもので、危険率1%で有意な相関があり、塩分とDO濃度との間に密接な関連のあることが認められた。

これらのことから沿岸域では外洋水の影響が及びにくいいため貧酸素化が進行しやすい水域であると考えられた。

3.3.3 底層水中の有機物および底泥の酸素消費量

表層で生産された有機物は沈降過程で分解を受け、その残渣が底層水中に蓄積し、さらに未分解の有機物が底

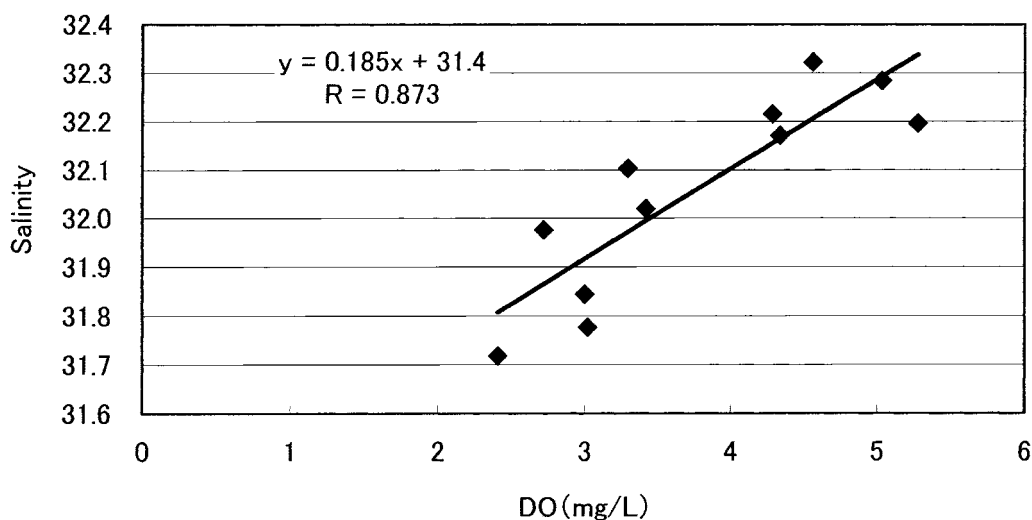


Fig. 12 Relationship between concentration of DO and salinity in summer

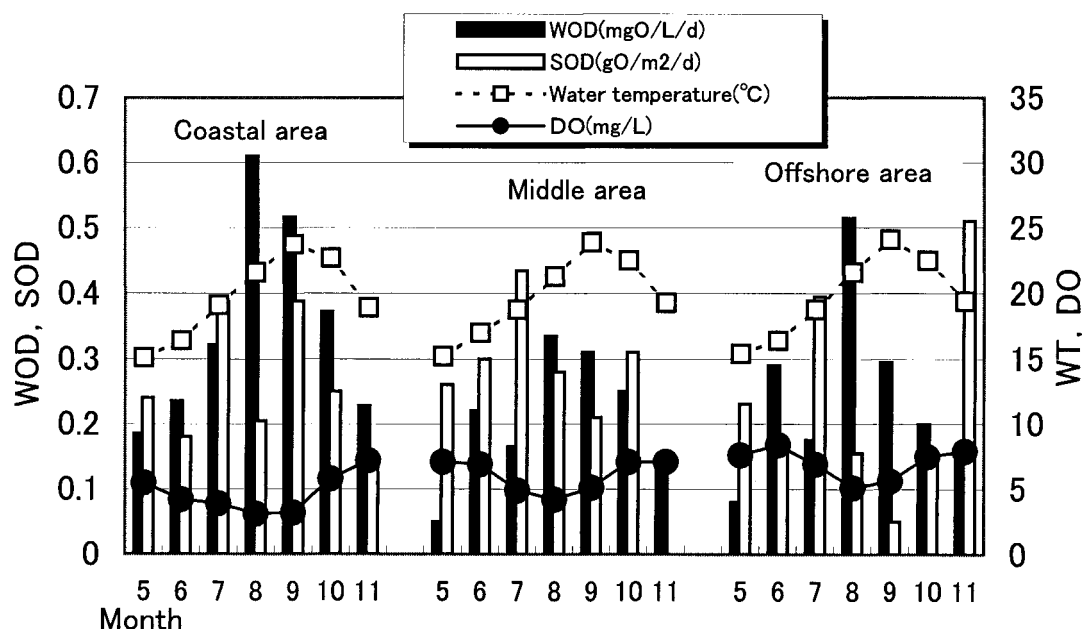


Fig. 13 The monthly variation of WOD, SOD and DO in the 1995-1997 fiscal year

泥上に堆積する。ここでは底層水中の酸素消費速度 (WOD) と底泥酸素消費速度 (SOD) を室内実験で求め、貧酸素水塊発生との関わりについて検討した。

水域別のWOD, SOD, 水温, DO濃度の推移 (Fig. 13) を見ると、WODの測定範囲は0.05~0.61mgO/L/dであり、各水域とも8月に最大となり、冬季にかけて低下する推移を示した。

沿岸域では8月に0.61mgO/L/dの高値を示し、他水域に比べ底層水中の酸素消費速度が活発であることを示した。一方、SODの測定範囲は0.05~0.51gO/m²/dで、各水域とも夏季に高くなる傾向を示すが、WODのような明確な季節的变化は見られなかった。水域別の比較では沿岸域や中間域はほぼ同程度の酸素消費速度を示し、沖

合域ではやや低い値であった。ここで、WODの数値をgO/m²/dに換算してSODと比較する。この単位は底泥とB-1mの間の1m層厚で積分した単位面積当たりとして示されるため、数値はFig. 13のWODの値と同じである。Fig. 13から各水域で8、9月にはWODがSODを上回り、特に貧酸素水塊が顕著となるこの時期はWODがSODの1.9倍の酸素消費速度を示した。水温は5月以降上昇し9月にピークとなり以降低下する推移を示し、DO濃度は、8、9月に最も低下する季節的变化が見られた。以上のことから、貧酸素化の進行は5~9月にかけて水温の上昇とそれに伴うWODおよびSODの増大が関与し、その進行に対してはSODに比べWODの寄与が大きいと考えられた。

3.3.4 WODと水中有機物現存量との関係

広島湾におけるPOCの起源は大部分が内部生産起源であることが認められている[8][9]。生産されたPOCは沈降しながら、あるいは底層や底泥上でPOC→DOC→無機化の各過程で微生物分解を受け酸素が消費される。

そこで、WODと水中の有機物(TOC, DOC, POC)現存量との関係について検討した。検討には1995~1997年度の調査から貧酸素水塊の消長期間を考慮して5~11月のデータを用いた。検討方法は有機物の生産・分解過程をみるため、DOCとPOCについてそれぞれ生産層(有光層)と底層における現存量を求め、水域別の比較を行った。生産層における現存量は表層(水深0 m)から補償深度までを生産層とし、底層は底泥からB-1mまでの現存量とした。補償深度は透明度×2.1として推定した[10]。

Table 2に水域別の有機物の現存量を示す。

まず、生産層での水域別の比較をすると、TOCとDOCは沿岸域から沖合域に向けて増加する傾向がある。広島湾では有機物濃度は沿岸域で高く、沖合域に向かうにつれ低くなることが認められている[9]が、上記の現存量の傾向とは逆の結果を示した。これは生産層の厚さに起因する。すなわち、生産層の厚さが沿岸域の約6 mに対し、中間域では約10m、沖合域で約11mであり[8]、生産層の厚い水域ほど有機物の現存量が大きくなるためである。TOC, DOCの季節的な推移では5月から11月にかけて増加する傾向がある。一方、POCは水域間の違いは

ほとんど認められず、季節変動では夏季(7~9)で高く、沿岸域、中間域、沖合域でそれぞれ5.0~5.6, 4.7~5.7, 4.1~5.9gC/m³となり、この時期内部生産が活発であることが分かる。また、DOCのTOCに占める割合は各水域ともPOCに比べ大きく、60%を越える(Fig. 14)。

これは、POCが分解後DOCに変換されることによるものと考えられる。一方、底層ではTOC, DOC, POCは水域別にも季節的にもほぼ同じ現存量で推移し、DOCのTOCに占める割合は70%以上と生産層に比べ大きく、底層でのDOCの割合がさらに増えている(Fig. 14)。生産層、底層ともDOCの占める割合が大きいが、これは、POCに比べDOCの分解速度が小さいことによると考えられ、貧酸素化に対するPOCの寄与が大きいかを示す。

そこで、POCに着目して貧酸素水塊発生時期(7~9月)のWODへの影響をTable 2の7~9月の平均値を用いて検討した。生産層では沿岸域、中間域、沖合域でそれぞれ5.4, 5.4, 5.2gC/m³とほぼ同じ現存量を示すのに対し、底層では0.57, 0.39, 0.33gC/m³となり沿岸域が他の水域に比べ約1.5倍高い現存量を示した。沿岸域の底層でPOCの現存量が大きいのは生産されたPOCは沈降過程で容易に分解を受けるものの[11]、水深の浅い沿岸域(平均水深約13m)ではWODの基質となる有機物(未分解のPOC)が他の水域に比べ多く負荷されることを示す。すなわち、WODはPOCに依存していることが考えられた。沖合域では中間域とほぼ同程度のPOCの負荷があるにもかかわらず、貧酸素水塊が発生していないが、これ

Table 2 The standing crops of organic carbon in Hiroshima Bay

Unit: gC/m³

Water area	Month	Euphotic Layer			Bottom Layer		
		DOC	POC	TOC	DOC	POC	TOC
Coastal area	May	6.4	4.5	11	1.3	0.45	1.7
	Jun	7.0	4.0	11	1.0	0.52	1.6
	Jul	8.1	5.5	14	1.3	0.57	1.9
	Aug	8.3	5.0	13	2.4	0.46	2.9
	Sep	9.6	5.6	15	1.3	0.68	2.0
	Oct	9.7	4.1	14	1.3	0.35	1.7
	Nov	10.4	1.9	12	1.5	0.40	1.9
Middle area	May	7.6	3.7	11	1.0	0.73	1.8
	Jun	6.3	4.4	11	1.0	0.39	1.4
	Jul	11.7	5.7	17	2.2	0.27	2.5
	Aug	12.6	4.7	17	1.9	0.51	2.4
	Sep	21.9	5.7	28	1.8	0.38	2.2
	Nov	16.8	4.4	21	1.8	0.29	2.0
Offshore area	May	19.0	3.3	22	1.5	0.30	1.8
	Jun	9.3	4.7	14	1.0	0.38	1.4
	Jul	10.9	5.2	16	1.2	0.62	1.8
	Aug	19.7	4.1	24	1.6	0.34	1.9
	Sep	19.4	5.5	25	2.2	0.38	2.5
	Oct	23.4	5.9	29	2.0	0.28	2.3
	Nov	22.8	4.9	28	1.8	0.30	2.1
		22.4	5.3	28	1.4	0.18	1.6

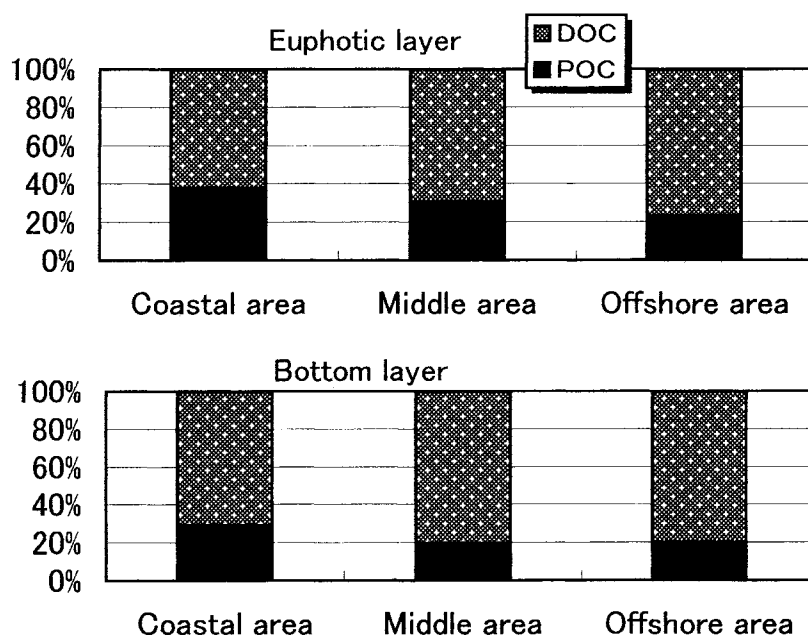


Fig. 14 The consistent of standing crops of organic carbon at euphotic layer (above) and bottom layer (below) during the occurrence of oxygen-deficient water mass (from Jul to Aug)

は有機物負荷の要因よりも前述の外洋水の影響が大きいことを示す。

3.3.5 貧酸素水塊の形成機構

前述の貧酸素水塊の形成要因から広島湾の貧酸素水塊形成機構を考察する。広島湾は閉鎖的な水域で、酸素を含む外洋水が沿岸域までは届きにくい地形的な構造にある。広島湾の沿岸域では7月頃から貧酸素水塊が発生し始める。この時期は河川水の流入による表層の塩分低下と水温の上昇により成層強度が強まり、酸素の底層への供給がされにくくなる。7～8月にかけて成層強度は弱くなるものの、底層の水温が上昇するため、貧酸素水塊の分布範囲の拡大や濃度の低下など貧酸素化の規模が拡大する。8～9月には底層水温が最高水温に達し、微生物活動が活発となる。このため、表層から負荷された有機物(POC)が底層と底泥で酸素消費される結果、沿岸から5 km沖までの沿岸域一帯で顕著な貧酸素水塊が形成される。沖合域では表層からの有機物負荷が少ないことや成層強度も弱く、外洋水による酸素供給の影響もあり、貧酸素水塊は全く形成することはなかった。

4 ま と め

1990～2001年度(1998年度を除く)の11年間のデータから広島湾の貧酸素水塊の発生状況と形成機構について検討した。

- ① 貧酸素水塊は7月頃から発生し、規模を拡大しながら8～9月に最も顕著となった。

- ② その発生範囲は沿岸から宮島の北端と似島の北端とを結ぶ線までの約5 kmの範囲であった。
- ③ 沿岸域の底泥はTOC, IL硫化物の濃度が高く、夏季(7～9月)に濃度の増加が著しかった。
- ④ 沿岸域では貧酸素水塊の発生時期に底泥から栄養塩類が溶出していることが示唆された。
- ⑤ 貧酸素水塊の形成要因として成層強度、外洋水の影響、酸素消費量、有機物量について検討し、貧酸素水塊の形成機構を次のように考察した。“広島湾沿岸域は地形的に外洋水が届きにくい構造にある。7月頃に成層強度が強くなり、沿岸部で貧酸素水塊が発生し始める。7～8月には底層水温の上昇により貧酸素化の規模が拡大する。8～9月には底層水温が最高に達し、微生物活動が活発となるとともに、表層から底層や底泥に負荷された有機物(POC)の分解により酸素が消費される結果、沿岸域で顕著な貧酸素水塊が形成される。”

参 考 文 献

- [1] 広島県 環境白書 昭和53年～平成12年
- [2] 伊達悦二, 清木 徹, 井澤博文, 星野 響, 広島湾における炭素, 窒素, リンの循環, 水質汚濁研究, 12, 29-36, 1989
- [3] 佐々木克之, 内湾および干潟における物質循環と生物生産(4) 東京湾の青潮の形成機構, 海洋と生物, 17, 249-254, 1993
- [4] 愛知県水産試験場漁場環境研究部 (2006) : 伊勢・

- 三河湾貧酸素情報 (H17-8号)
- [5] 中嶋昌紀,大阪湾東部沿岸域における貧酸素水塊について,大阪府水産試験場研究報告, 9, 1-10, 1995
- [6] 昭和63年環水環第127号
- [7] 日本海洋学会 (1970): 海洋観測指針 (気象庁編), p. 1~417
- [8] 伊達悦二,星野 響,広島湾の物質循環機構の解明に関する研究 (第2報) - 栄養塩類の季節変化について -, 広島県保健環境センター研究報告, 3, 72-81, 1982
- [9] 伊達悦二,広島湾の物質循環機構の解明に関する研究 (第3報) - 懸濁物の化学組成について -, 広島県保健環境センター研究報告, 5, 67-71, 1983
- [10] 伊達悦二,星野 響,広島湾の物質循環機構の解明に関する研究 (第4報) - 一次生産量の季節変化と環境因子について -, 広島県保健環境センター研究報告, 6, 13-21, 1984
- [11] 清木 徹,伊達悦二,井澤博文,広島湾におけるセディメント・トラップ捕集物から推定した水中懸濁物の沈降フラックス,水質汚濁研究, 8, 304-313, 1985