

鹿児島湾奥部海域の中層低酸素現象について

日高富男, 島津誠一郎, 九万田一巳, 武田健二, 荒牧孝行

Studies on the Occurrence of Hypoxic Water Mass in Surface Mixed Layer of Inner Area of Kagoshima Bay^{*1}

Tomio Hidaka^{*2}, Seiichiro Shimazu^{*2}, Kazumi Kumanda^{*3},
Kenji Takeda^{*3}, and Takayuki Aramaki^{*3}.

Keywords : Hypoxic water mass, surface mixed layer, Kagoshima Bay

Abstract

This studies were carried out to explain the occurrence of hypoxic water mass on middle layer in the inner area of Kagoshima Bay. The distribution of transparency, water temperature, salinity, dissolved oxygen and pH in the area was investigated at various stations, from 1985 to 1987. The hypoxic water mass (DO, under 4 ppm) was found on 10~50 m depth layer, during September to October. The season was a beginning of circulation period and surface water mixing period. The hypoxia caused at the bottom on surface mixed layer. The environmental condition of seawater in that time was above 24°C of water temperature, under 32‰ of salinity, and over 10³ cfu/ml of bacterial cell count. They are considered to be an indicator on occurrence of hypoxic water. The surface mixed layer is a region of high concentration of organic matter in the water column, and the bacterial cells are grown there. This has caused the bottom water of the layer to become depleted in oxygen.

鹿児島湾は九州南端に位置し、薩摩半島と大隅半島に抱かれて、南から北へ深く湾入した、半閉鎖性の内湾である。それは南北約80km、東西約20kmと細長い、奥部からほぼ1/3のところで大隅半島と陸続きの桜島が横たわって湾奥部と湾中央部に区分される。それら両区は桜島と薩摩半島との間の西桜島水道によって連なるもの、その水道は幅約4km、水深約40mと狭くて浅く、鞍部状を呈している。湾奥部海域は表面積243km²、容積27km³の規模で、そ

*1 本研究は鹿児島県委託研究費によるものである。この一部は昭和61年4月、昭和61年度日本水産学会春季大会で報告した。

*2 鹿児島大学水産学部微生物学研究室 (Laboratory of Microbiology, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Simoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

*3 鹿児島県水産試験場 (Kagoshima Prefectural Fisheries Experimental Station, 21-1 Kinkou, Kagoshima, 892 Japan)

の海底地形は、海岸線から沖へ向かう急峻な傾斜面と、この海底の大半を占める水深ほぼ140mの平坦面とから成る海盆である。よって湾奥部は海水の交換が悪く、鹿児島湾の中でも特に閉鎖性が強い海域である¹⁾²⁾。さらに湾奥部周辺には大小さまざまな河川と鹿児島市をはじめ3市4町があり、それら河川水や都市排水の流入の影響は見逃せない³⁾。このように鹿児島湾奥部海域は、基本的には湾の形状や海底地形の影響を強く受けながら、加えて湾内海水の水平流動、鉛直循環の季節変動やさまざまな陸水の流入などによって海況や水質は多様に変動している。

この湾奥部海域では、1960年頃からかなり大規模なハマチ養殖事業がなされている。そこにおいて1984年9月から10月にかけて水深10m付近の中層で低酸素水塊 (DO, 4 ppm 以下) が発生した。それ以来秋期に発生する中層低酸素現象は同海域における養殖魚類の活力に多大の影響を与え、摂餌低下、成長不振等をまねき、さらには斃死に至るものもあって養殖漁業に大きな打撃となっている。今後ともこの現象が継続発生すれば、同海域での魚類養殖業の存続すらが危惧されている。

一般に養殖ハマチは、飼育水中の溶存酸素量が5 ppm 以上であれば正常であり、4 ppm になると摂餌低下がみられ、3 ppm で異常遊泳・呼吸困難、2.5~1.7 ppm で瀕死状態、2~1.5 ppm で窒息死に至るとされている⁴⁾。よって本研究においては溶存酸素量4 ppm 以下を低酸素水塊と見なしている。

海水中の溶存酸素は、海表面における大気からの酸素の溶解や光エネルギーを利用する植物の炭酸同化作用による酸素の発生などにより増え、表層ではほぼ飽和濃度にあり、水深が増すにつれて次第に減少する。一方、海水中での酸素の消費は無機・有機物の酸化反応や動植物の呼吸作用によって起こる。よって現場海域の溶存酸素の分布は、その無機・有機成分の組成や濃度及びそこに生息する生物の種類によって異なり、さらに海水の移動とも関連して複雑な様相を呈する。微生物による有機物の分解は、酸素消費の立場から言えば、きわめて活発な触媒である。

一般的な水深の浅い (50m以下) 内湾、例えば東京湾、三河湾、瀬戸内海燧灘、大村湾などには、夏期に表面水温が上昇し水温躍層が出現して成層を形成すると、表層水と底層水とは混合しにくくなる。そして底層では沈降した有機物を微生物が分解する結果、周辺の溶存酸素は急速に消費されて、低酸素水塊が出現する。この状態がしばらく続くと、低酸素水塊が発達して表層付近まで影響を及ぼすことが知られている⁵⁾。しかし、鹿児島湾奥部海域では水深が140mもあるなかで、その水深10~50m範囲内の中層において、その上下の水塊よりも溶存酸素量が低い (4 ppm 以下) 状態として現れる。本報で中層低酸素現象というのは、このような中層水の低酸素化を意味し、底層の低酸素状態は含めない。湾奥部海水の夏から秋にかけての鉛直循環はせいぜい表層から水深80m位の範囲であり、かりに底層が低酸素化していたにせよ、それが中層にまで影響を及ぼすことはないだろう。従って、中層における低酸素水塊の出現はこの海域に独特な現象であると考えられる。本調査・研究はこの中層低酸素現象の発生機構を究明すると共に対策技術の確立を図ろうとするものである。その一環として湾奥部海水の透明度、水温、塩分、溶存酸素量などの環境条件を測定し、併せてそれら海水からの従属栄養細菌細胞数の計数とその細菌相を検討した。それらの結果、興味ある知見をえたので取りまとめて報告する。

実験材料及び方法

調査海域と時期 本調査では、Fig.1に示すように鹿児島湾奥部海域に14定点と、対照として湾中央部に1定点の計15定点を設けた。それら15定点について水平的に調査し、そのうち3～5定点について鉛直的な精密調査を加えた。各定点の水深は、桜島水道鞍部に近いSt.11が約65mと浅く、湾奥部の他の定点は110～140m、湾中央部のSt.5は約200mである。調査年度毎に定点を適宜選びながら調査した。調査時期は、毎年8月から11月までの間であり、その間に4～6回調査した。各回の調査には約6時間を要し、ほぼ全日の作業量である。

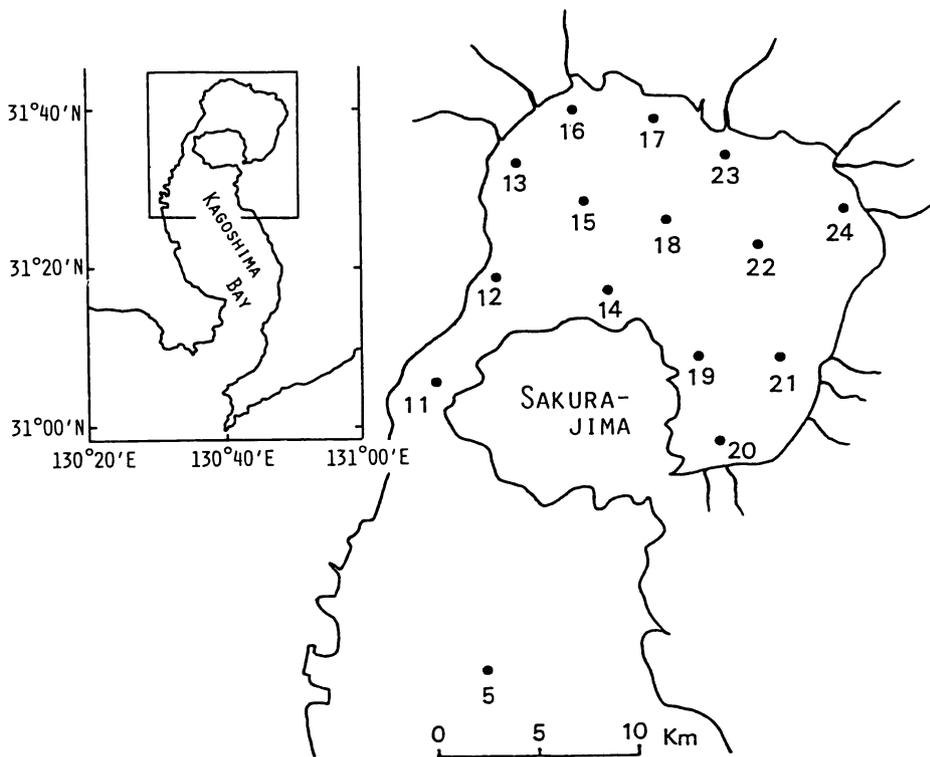


Fig. 1. Map of the Kagoshima Bay and location of the sampling stations in inner area of the bay.

試料海水 調査は、本学練習船南星丸と鹿児島県水産試験場調査船を利用して行った。試料海水の採取は、各調査定点における所定深度から、化学的調査及びプランクトン調査項目の試水は北原式採水器を用い、また微生物学的実験の試水はJ-Z式無菌採水器を用いて行った。試水はいずれも所要容量の滅菌ポリびんに入れ、クーラー内(15℃)に収めて研究室に持ち帰り、直ちに実験に供した。

測定項目と測定法 試料採取時には、その時の気象、海況を観測し、また各定点の透明度 (m) 及び各定点の所定深度における水温 (°C)、塩分 (‰)、溶存酸素量 (DO, ppm)、pH を測定した。透明度は透明度板 (Secchi disk) を用いる常法によって測定した。水温、塩分、溶存酸素量は YSI-SCTメーター-33型と YSI-DOメーター-58型の両機器を併用して、水深 1~50m を 5 m 毎に連続的に測定した。pH は ORION-イオンメーター-407A 型を用いて採取海水について直ちに測定した。

海洋細菌の計数・分離・同定法 海洋細菌の計数・分離・保存には ZoBell 2216E 培地、ST・10⁻¹培地を併用した。試料海水中の細菌細胞数は、試水を適宜希釈してその0.1mlずつをそれぞれの培地平板10枚に塗抹接種して25°Cで4~6日間培養し、出現したコロニーを計数して生菌数 (cfu/ml) を算定した。同時にそれら出現コロニーを分離、純化して、以後の実験に供するために保存培養した。分離菌は所定の性状を検査した上で Bergey's manual⁶⁾に照らして菌属レベルで同定した。

実験結果

1. 調査海域における低酸素水塊の水平分布

まず1985年9月3日、9月25日、10月16日、11月14日の各調査日の天気、気温、潮汐や前日の雨量などの概要を Table 1 に示した。この年、8月30日に台風12号が31日に台風13号が来襲した。また9月23日には秋雨前線の停滞により豪雨があった。それらの影響が調査結果

Table 1. Meteorological and oceanographical data on each sampling date.

Date (in 1985)	Sep. 3	Sep. 25	Oct. 16	Nov. 14
Weather	clear	cloudy	cloudy and rainy	cloudy and rainy
Rainfall (mm)				
the day	none	0.0	3.0	5.0
before 1 day	4.5	0.0	0.0	5.0
2	1.0	65.5	0.0	12.0
3	54.0	2.0	20.0	3.5
4	46.0	11.0	0.5	0.5
5	0.0	5.0	0.0	0.0
Temperature (°C)				
Max.	33.0	28.3	24.1	13.3
Min.	25.1	21.9	19.2	7.4
Tidal hour				
H*	09:02	17:45	08:22	08:15
L*	15:14	11:06	14:26	14:11
Moon's age	17.7	10.3	1.9	0.5

* H: High tide L: Low tide

の随所にみられた。

次に、それら調査日における水深10m層での低酸素水塊の水平分布をFig. 2に示した。fig. 2に、黒丸で表すDO 4 ppm以下の低酸素水塊は9月3日には見られなかったが、9月25日において湾奥部の北西側のSt. 13, 15, 16, 18, 22, 23, 24を含む広範囲に認められた。10月16日にはその範囲が狭くなり、St. 13, 16, 17に低酸素水が残ったが、11月14日には湾奥部の全海域においてDO 5 ppm以上となった。

2. 精密調査定点における各測定項目の経時・鉛直変動

1985年の調査定点の中からSt. 5, 11, 16, 18, 21の5定点を選び、それら定点での透明度〔Transparency, Trans. (m)〕及び各定点の水深1, 10, 25, 50, 100 m及び海底上10 m層海水の水温〔Water temperature, WT (°C)〕, 塩分〔Salinity, S (‰)〕, pH, 溶存酸素量〔Dissolved oxygen, DO (ppm)〕と細菌細胞数〔Bacterial cell count, Bact. cells (cfu/ml)〕の経時的、鉛直の変動をTable 2-(1)～(4)に示した。

所定定点のうち、St. 5は湾奥部に設けた定点で湾奥部海域の諸定点に対する対照点として、St. 11は西桜島水道に近い定点、St. 16は新興住宅地である始良・加治木両町の地先であって、かつ思川、別府川、網掛川3河川の流入域内の定点である。St. 18は湾奥部海域の中央に位置し、St. 21は牛根養魚場に近い定点として、それぞれ意味をもたせて選んだ定点である。

St. 5では9月25日に水深25m層でDO 5 ppmを若干下まわる水塊がみられたが、その前後の調査で水深1～50m層においてDO 5 ppm以下になることはなかった。St. 11ではこの年4回の調査において中層低酸素現象は現れなかった。St. 16ではこの年、水深1, 10m層の調査にとどまり、それ以深のデータが欠落して残念であるが、水深10m層のDOは9月3日にすでに5 ppmを下り、9月25日には3.5 ppm, 10月16日には2.9 ppmと明らかな中層低酸素現象がみられ、11月14日にはそれら低酸素化が終息して6.1 ppmを示した。St. 18においては9月3日に水深25m層でDO 4.5 ppm, 9月25日には10～25m層で4 ppmを下り中層低酸素状態を呈し、10月16日に25m層でなお3.8 ppmと低酸素水塊が残るが11月14日にはそれも解消した。St. 21は意外に低酸素化が弱く、9月25日に水深25m層でDO 3.6 ppmと低酸素化をうかがわせたが、その後回復に向い、10月16日にはほぼ平常に戻った。

このような低酸素水塊分布の経時・鉛直変動については次のように要約できる。この年4回の調査において中層低酸素現象がみられたのは、なか2回の9月25日と10月14日であった。また低酸素化は水深10m層から20m層の間にみられ、それらは初期に浅く後期に深くなる傾向が知られた。それらの知見を前提として、それらに関わる水温と塩分の変動をTable 2-(1)～(4)から考える。

まず水温との関連についてみれば、9月3日の調査では表層から水深50m層までの間に明瞭な水温躍層が形成されて成層状態であった。その後の調査日では気温の低下（Table 1参照）にともなって表層水温が徐々に低下し、表層海水の対流による循環が始まり、それが調査日を追って深部へ進行した。それをSt. 18を例にとって詳述すれば、9月3日には水深1 m層の水温が28.4°Cで水深50m層の水温が23.8°Cであり、その間に水温の躍層が見られた。9月25日には水深1～10m層の水温が26.6°C均一となり、同様に10月16日には水深1～25m

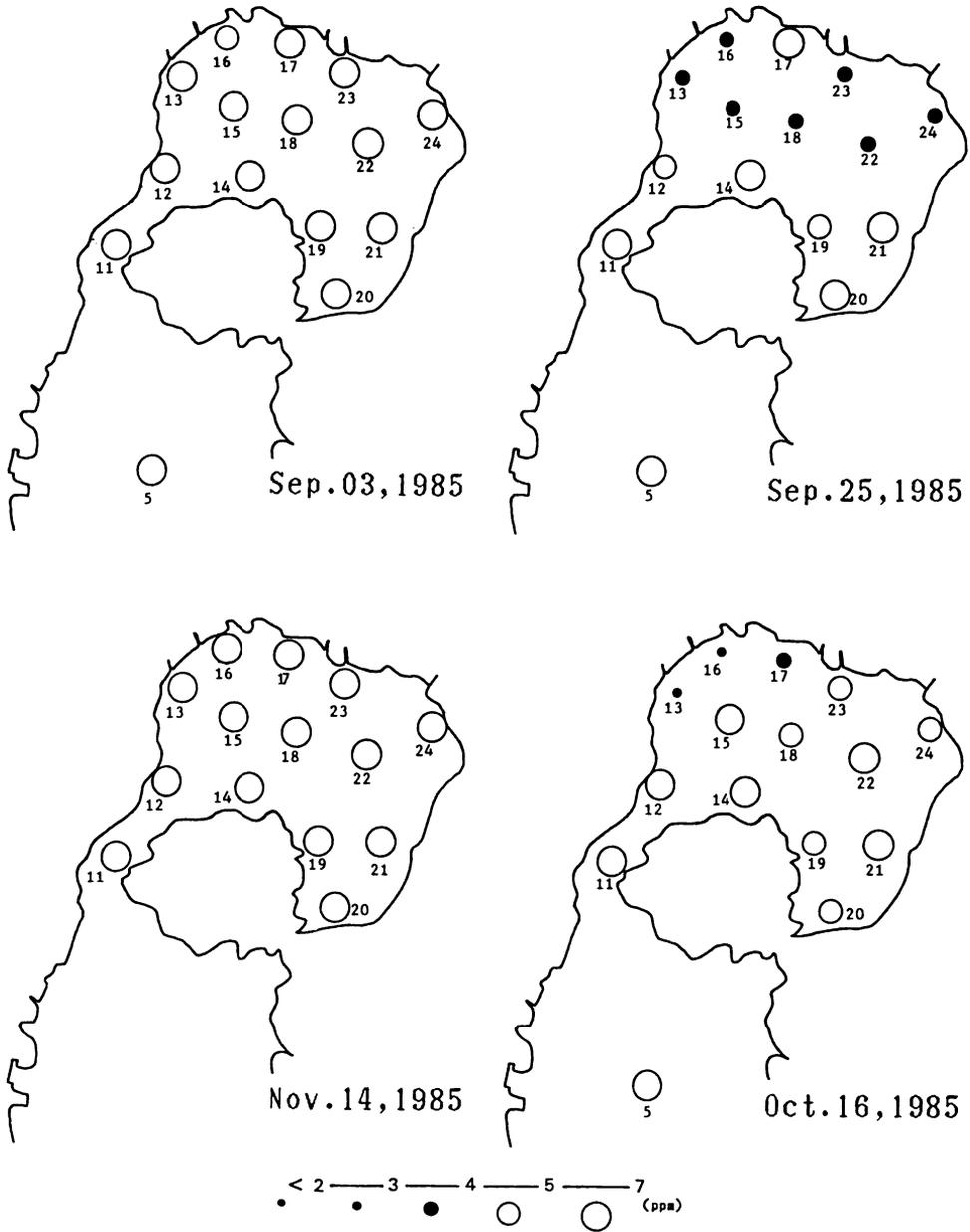


Fig. 2. Horizontal distribution of the dissolved oxygen at 10 m depth layer at various stations on sampling date, in 1985.

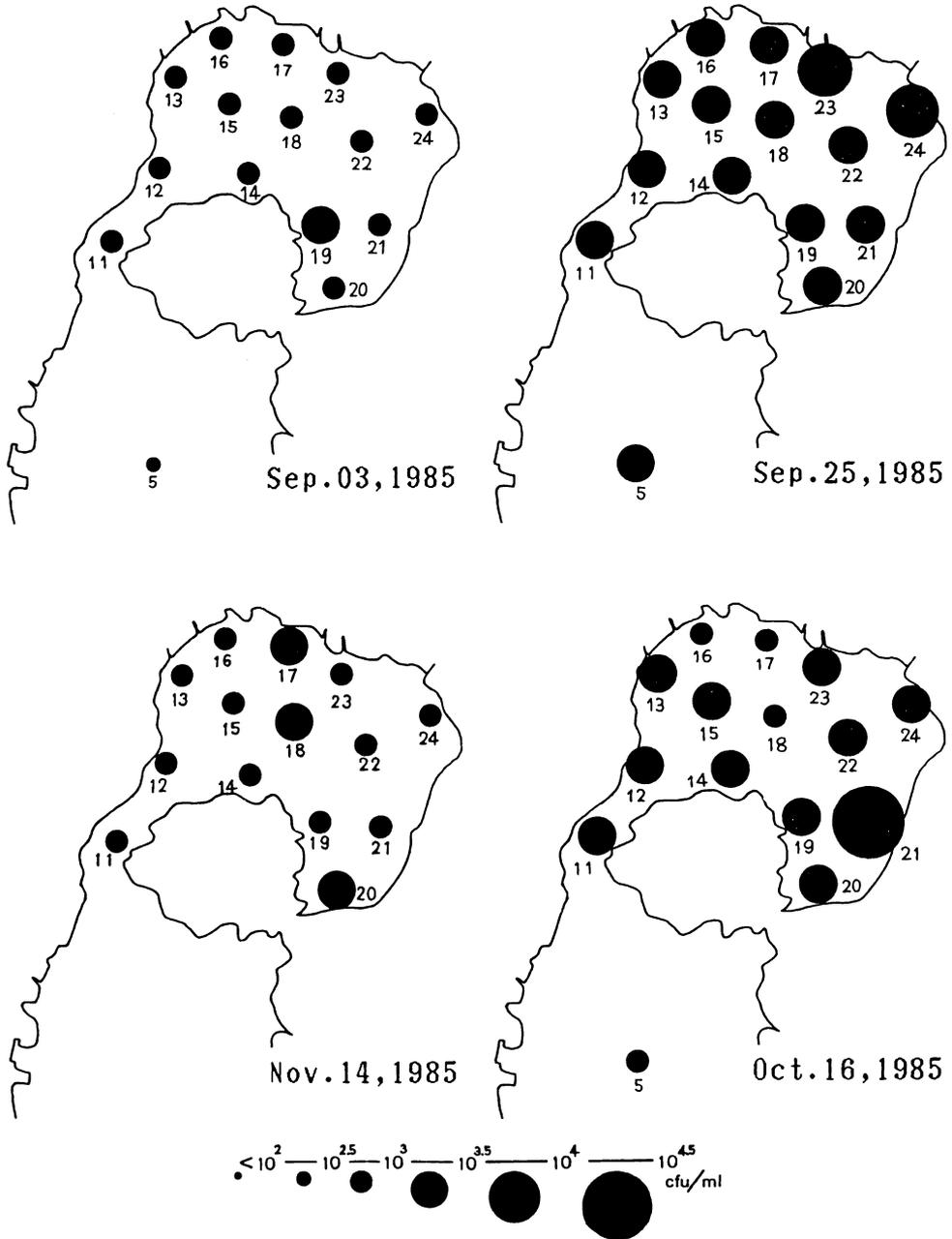


Fig. 3. Horizontal distribution of the bacterial cell count at 10 m depth layer at various stations on sampling date, in 1985.

層の水温が24.3℃, 11月14日には水深1~50m層の水温が21.4℃均一となったが, それら以深にはなお温度躍層が見られた。つまり, 循環期に入って表層混合が起こりその範囲が段々と深層へ広まる様子がうかがえる。そのような変動期の中で, 中層低酸素現象がみられた時期は, ちょうど循環期の初期で水深25m以浅の範囲で海水が表層混合され, しかも水温が24~27℃と高く, 細菌の増殖に好適な温度条件下であった。その表層混合層では表層の溶存酸素や有機物を多く含む海水がある深さまで混合されているので, 細菌はその有機物を分解しながら増殖して酸素を消費する。水深0~10m位においては大气からの酸素の供給や植物プランクトンの酸素生産による補給などによってDOは高いレベルで保持されるが, 10~25m深層では酸素の消費の方が補給に勝り徐々に低酸素化するものと考えられる。中層低酸素現象は水深0~25m層の範囲位で海水が循環混合され, しかも水温が24℃を下らない条件を

Table 2-(1). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, September 3 in 1985.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%) ^{*5}	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
5	200	10.5	1	29.4	32.3	8.1	7.3	110.7	1,400
			10	26.5	32.3	8.1	6.4	92.7	250
			25	26.1	32.7	8.1	6.0	85.6	170
			50	23.7	32.7	8.0	5.0	68.5	260
			100	16.9	33.7	7.9	4.8	59.3	100
			190	15.4	33.9	7.9	4.3	52.3	
11	65	5.5	1	28.0	31.1	8.1	6.6	96.6	1,700
			10	27.0	32.2	8.1	5.7	83.2	850
			25	26.6	32.4	8.1	5.5	80.1	540
			50	23.9	32.5	8.1	4.8	66.4	460
16	110	5.0	1	29.0	29.5	8.2	6.8	100.2	
			10	27.0	32.5	8.2	4.8	70.2	440
18	140	7.5	1	28.4	32.3	8.2	6.0	90.4	800
			10	27.3	32.5	8.2	6.1	88.9	620
			25	26.1	32.6	8.1	4.5	64.9	390
			50	23.8	32.7	8.1	4.0	55.3	150
			100	16.7	33.4	7.8	3.8	47.1	150
			130	16.3	33.4	7.8	3.9	47.6	
21	135	9.0	1	29.4	32.3	8.2	6.2	93.6	420
			10	27.2	32.5	8.2	5.9	86.7	650
			25	26.9	32.6	8.2	4.6	67.5	270
			50	25.1	32.7	8.1	4.4	64.3	
			100	16.6	33.6	7.8	3.7	46.0	90
			120	16.4	33.6	7.7	3.7	46.2	

* 1, Transparency; * 2, Water temperature; * 3, Salinity;

* 4, Dissolved oxygen; * 5, Saturation; * 6, Bacterial cell count.

を備える頃に表層混合層の底層部に現れると言えよう。

次に塩分についていえば、調査データの大部分が表層で32‰位で深度を増すにつれて34‰位までに上がっていた。しかし調査日の数日前に雨量50mm以上の降雨があった場合（Table 1参照）には表層水の塩分は低くなる。その傾向はSt. 16, 18に強く現れて、9月3日のSt. 16の表層水の塩分は29.5‰、9月25日のSt. 11のそれは29.5‰、St. 16とSt. 18では31.0‰、St. 21では31.4‰であった。そしてそのような条件下で中層低酸素現象がみられた。前述のように表層混合層の範囲において水温がほぼ同じであるので、海水の密度（ σ_t ）変化は水温より塩分に依存している。低塩分の陸水が流入することにより海水密度（ σ_t ）鉛直分布に傾斜を生じ、表層水と中層水との混合を妨げる。陸水とともに導入された汚濁物質の影響もあわせ考えるとき、表層水の塩分低下も中層低酸素出現に無関係ではありえず、確実な指

Table 2-(2). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, September 25 in 1985.

Station No.	Depth (m)	Trans. * ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%) ^{*5}	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
5	200	11.0	1	27.7	32.6	8.2	6.5	96.1	1,900
			10	27.1	32.8	8.2	5.6	82.2	1,300
			25	25.8	33.1	8.1	4.9	70.0	970
			50	19.6	33.3	8.1	4.8	62.6	160
			100	16.0	33.9	8.0	4.7	57.8	120
			190	15.2	33.9	7.9	4.3	52.5	
11	65	7.0	1	26.8	29.5	8.2	6.8	97.3	3,300
			10	26.8	32.6	8.2	5.4	79.2	3,200
			25	26.2	33.0	8.2	4.6	65.9	700
			50	25.9	33.1	8.1	4.8	66.7	860
16	110	8.0	1	27.4	31.0	8.3	6.2	89.5	
			10	26.9	32.5	8.2	3.5	51.7	1,800
18	140	6.5	1	26.6	31.0	8.3	6.4	91.7	1,500
			10	26.8	32.6	8.2	3.8	55.6	1,900
			25	25.7	33.1	8.1	3.6	51.4	710
			50	23.6	33.2	8.1	4.0	55.4	210
			100	16.7	33.7	7.8	3.6	44.6	110
			130	16.3	33.9	7.7	3.4	42.3	
21	135	11.0	1	27.2	31.4	8.3	6.4	93.2	3,000
			10	27.3	32.5	8.3	5.0	72.8	1,600
			25	25.9	32.8	8.2	3.6	51.8	500
			50	23.1	32.9	8.1	3.9	54.2	300
			100	16.6	33.7	7.8	3.4	41.8	600
			120	16.3	33.8	7.7	3.2	40.1	

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

標となろう。表層水の塩分が32‰を下る条件において中層低酸素化が誘導されるようである。

また pH の変動は、まず鉛直的には表層で pH 8.1~8.2 と高く、深度を増すにつれて低くなる通常の変動傾向であった。経時的には中層低酸素現象がみられた 9 月 25 日に水深 1 m 層の pH が 8.2~8.3 とその他の調査日のそれに比して pH 値にして 0.1 ほど高く、それ以深の pH も同様の傾向であった。さらに透明度について、St. 5 の透明度は湾奥部の定点のそれより高く、湾奥部定点の中では St. 21 が高かった。9 月 3 日から秋が深まるにつれて透明度が高くなり中層低酸素化が終息した 11 月 14 日には 10 m 以上となっていた。海水の pH や透明度は海水中のプランクトン量との関連が考えられるが、この年の調査においてプランクトン沈殿量をも測定し、DO 分布との関わりを検討したが、それらの間に相関は見出し得なかった。ともあれ、DO の変動とその他の測定項目の変動との関わりについては、さらに詳細な調査が必要である。

Table 2-(3). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, October 16 in 1985.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%)* ⁵	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
5	200	9.0	1	24.3	32.8	8.0	6.7	92.9	450
			10	24.4	33.0	8.0	6.2	86.2	340
			25	24.2	33.7	8.0	6.1	85.5	230
			50	24.2	33.8	8.0	5.5	77.8	83
			100	16.7	34.1	7.9	4.7	57.9	110
			190	15.3	34.2	7.8	3.8	46.6	
11	65	8.0	1	24.5	32.3	8.0	6.6	91.8	640
			10	24.3	32.6	8.0	6.0	83.2	1,400
			25	24.2	33.1	8.0	5.7	79.6	730
			50	23.7	33.3	8.0	5.7	76.7	460
16	110	5.8	1	24.1	32.0	8.1	7.1	97.7	
			10	24.7	32.7	8.0	2.9	41.2	560
18	140	7.2	1	24.3	31.8	8.1	6.7	93.0	520
			10	24.4	32.7	8.0	4.3	59.6	490
			25	24.1	33.1	7.9	3.8	52.9	210
			50	22.2	33.2	7.9	3.8	51.6	180
			100	16.9	33.9	7.6	3.2	40.2	55
21	135	6.8	1	24.4	32.4	8.1	6.3	87.6	6,100
			10	24.3	32.5	8.0	5.4	75.3	14,000
			25	24.1	32.9	8.0	4.4	61.7	420
			50	23.0	33.2	7.9	4.1	55.7	210
			100	16.9	33.9	7.6	3.0	37.6	130
			120	16.3	33.9	7.5	2.9	36.1	

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

Table 2-(4). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, November 14 in 1985.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT** ² (°C)	S** ³ (‰)	pH	DO** ⁴ (ppm)	(%)** ⁵	Bact. cell (cfu/ml)** ⁶
11	65	8.0	1	21.4	33.2	8.0	5.6	75.2	770
			10	21.2	33.1	8.0	5.3	70.3	590
			25	21.5	33.4	8.0	5.2	69.9	460
			50	21.7	33.5	8.0	5.2	69.8	400
16	110	9.5	1	21.0	32.1	8.1	6.5	85.9	
			10	21.4	33.2	8.1	6.1	81.3	1,000
18	140	10.3	1	21.4	33.1	8.1	5.9	79.0	1,500
			10	21.3	33.0	8.1	5.3	71.0	2,600
			25	21.4	33.4	8.1	5.2	69.8	1,200
			50	21.9	33.4	8.1	4.8	65.3	270
			100	17.2	33.9	7.8	2.8	34.7	180
21	135	13.5	1	21.4	33.1	8.1	6.2	81.9	420
			10	20.9	33.2	8.1	5.1	66.9	400
			25	20.6	33.4	8.1	5.0	66.1	640
			50	21.6	33.4	8.1	4.4	59.5	250
			100	17.0	33.9	7.9	2.7	34.3	230
			120	16.7	33.9	7.6	2.6	32.3	

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

3. 調査海域における従属栄養細菌の分布

1985年の調査において供試海水中の従属栄養細菌細胞数を算定し、その結果を水深10m層における水平分布としてまとめFig. 3に、また精密調査定点における鉛直分布をTable 2-(1)~(4)に示した。まずFig. 3に見られるように、調査海域における調査期間中の海水中細菌細胞数は $10^2 \sim 10^4$ cfu/mlの範囲で変動しているが、通常のそれは $10^2 \sim 10^3$ cfu/mlであった。中層低酸素現象がみられた時期や海域では細菌細胞数が増加し、通常の5~10倍に達していた。次いでTable 2-(1)~(4)で、深度別に比較すると、深度を増すにつれて細菌細胞数は減少していた。正常時には水深1mから50mまでの範囲で細菌細胞数の差は少ないが、中層低酸素出現期の調査日9月25日、10月16日には水深1m、10m両層の細菌細胞数が目立って多く、25m以深との差が大きい。これらのことは低酸素状態の出現には細菌活性が関わりをもつことを示唆する結果であった。さらに細かく定点ごとに低酸素化と細菌細胞数との関連を見れば、必ずしも相関しないところがあるが、それは細菌相の組成の違いを意味するものと考えられる。

4. 供試海水中的細菌属組成の差異

1985年の調査の中で顕著な中層低酸素現象がみられた9月25日の調査における St. 5, 11, 14, 16, 18, 21の水深10m層, 及び定点18の1, 10, 25, 50, 100m層の海水から分離した細菌について, 性状を検査し細菌属レベルで同定して各供試海水中的細菌属組成を算出した。それらの細菌属組成を水平的に比較した図が Fig. 4で, 鉛直的に比較したものが Fig. 5である。両図を通して, 全試水において *Vibrio*, *Aeromonas*, *Pseudomonas* の3属が細菌相の大部分を占め, 試水によってそれら3属間の割合が変動していた。Fig. 4に示す St. 5は前述の通り湾中部に設けた対照点で, St. 11から21までが湾奥部の入口から奥へと進む順序である。湾奥部入口の St. 11から奥に進むにつれて *Vibrio* の割合が増し, それに逆比例して *Pseudomonas* が減少しているが, *Aeromonas* の変動は小さかった。低酸素現象がみられた St. 16, 18, 21ではそれらの細菌属組成の半分以上が *Vibrio* で占められていた。湾中部の St. 5の海水中細菌属組成では特に *Aeromonas* が多く, 湾奥部のそれらとは異なっていた。次いで, Fig. 5で St. 18における細菌属組成を鉛直的に比較すると, それらの組成に

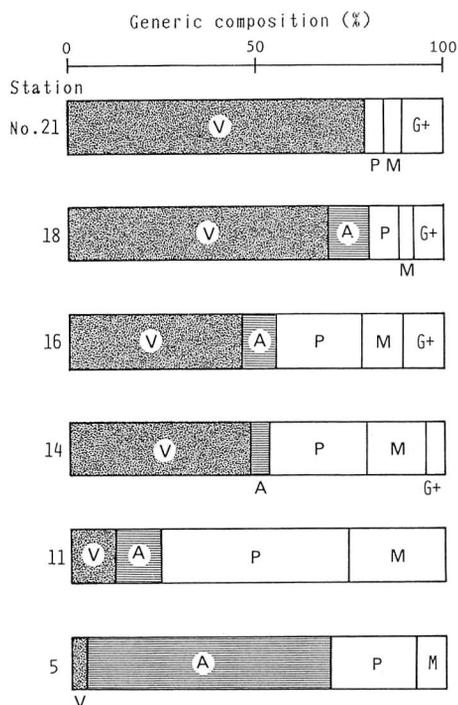


Fig. 4.

Horizontal change in the generic composition of bacteria in seawater collected from 10 m depth layer at various stations, September 25 in 1985.

Generic abbreviations: V = *Vibrio*, A = *Aeromonas*, P = *Pseudomonas*, F = *Flabacterium*, M = *Moraxella*, G⁺ = Gram's positive

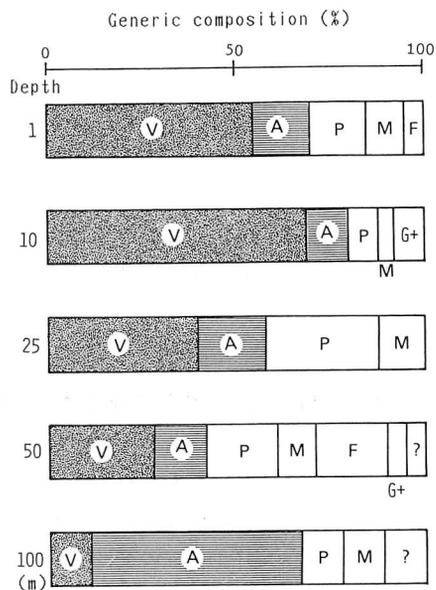


Fig. 5.

Vertical change in the generic composition of bacteria in seawater collected from various depth layer at St. 18, September 25 in 1985.

Generic abbreviations: V = *Vibrio*, A = *Aeromonas*, P = *Pseudomonas*, F = *Flabacterium*, M = *Moraxella*, G⁺ = Gram's positive

占める *Vibrio* の割合は水深 1 m 層で 55% あり、10 m 層で 69% と増え、それをピークに以後深度が増すにつれて減少する傾向がみられた。一方 *Pseudomonas* の割合の変動は小さくて特定する傾向は見られなかった。*Aeromonas* は 1~50 m 層では 13~30% と変動は少ないが、100 m 層では 72% とその組成の大半を占めていた。これら水平・鉛直的な観察から中層低酸素状態にある海水中では、*Vibrio* 属菌が優占であることが知られ、この菌属がこの期中層低酸素化に大きく関わっていると考えられる。

5. 1986年の追調査の結果

これまでに記述した知見をさらに詳細に検討するため、1986年も同様な調査をよりきめ細やかに行った。この年には、St. 11, 16, 18, 21 の 4 定点において鉛直的な変動を観察することを主眼とした。各定点の調査深度は 1, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 m の 8 層であっ

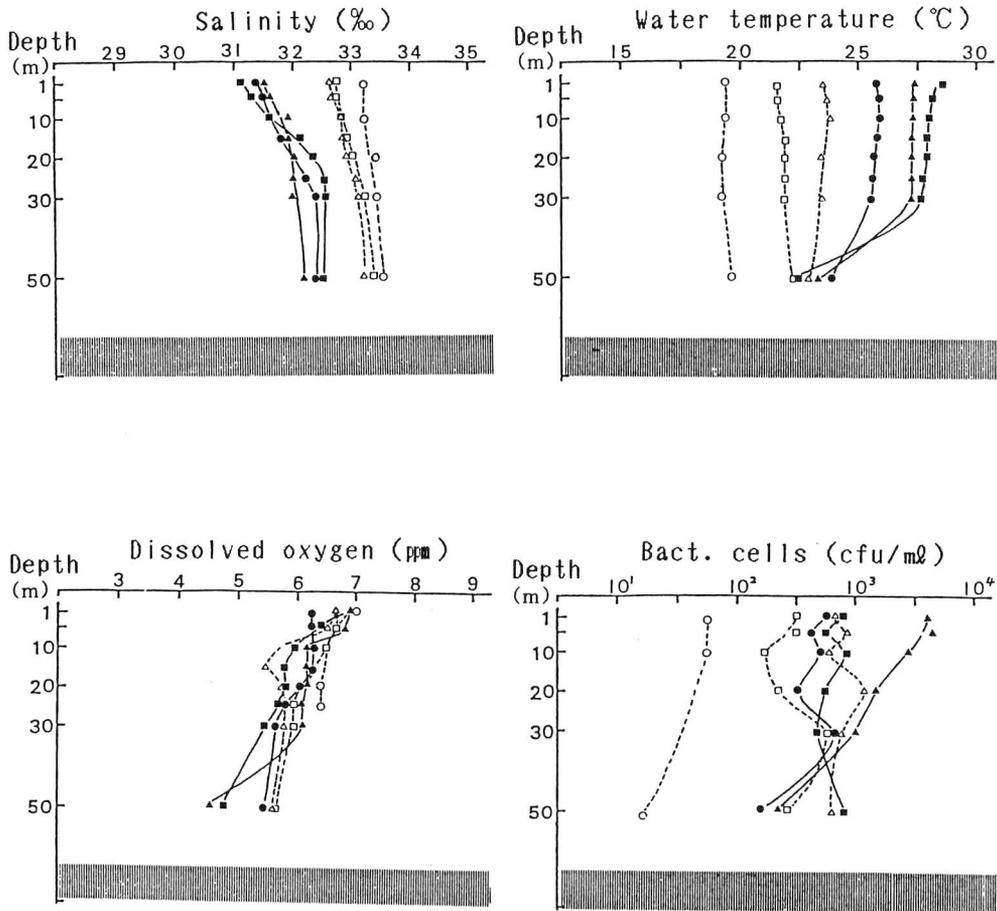


Fig. 6-(1). Vertical distribution of water temperature, salinity, dissolved oxygen, and bacterial cell count at St. 11, during September to November in 1986.
 ▲, Sep. 1; ■, Sep. 8; ●, Sep. 24; △, Oct. 15; □, Oct. 28; ○, Nov. 26.

た。また調査日は9月1日, 9月8日, 9月24日, 10月15日, 10月28日, 11月26日の6回であった。調査項目とそれらの調査結果は Fig. 6-(1)~(4) に示した。これらの結果を通覧すれば, この年も St. 16, 18 において9月8日, 9月24日の調査時に中層低酸素現象がみられた。St. 11 は西桜島水道の鞍部に位置し, 水深も浅く, 潮汐流による海水の水平流動や湧昇などによる海水混合もあって, 中層低酸素化は見られない。また St. 21 では, 大きな河川

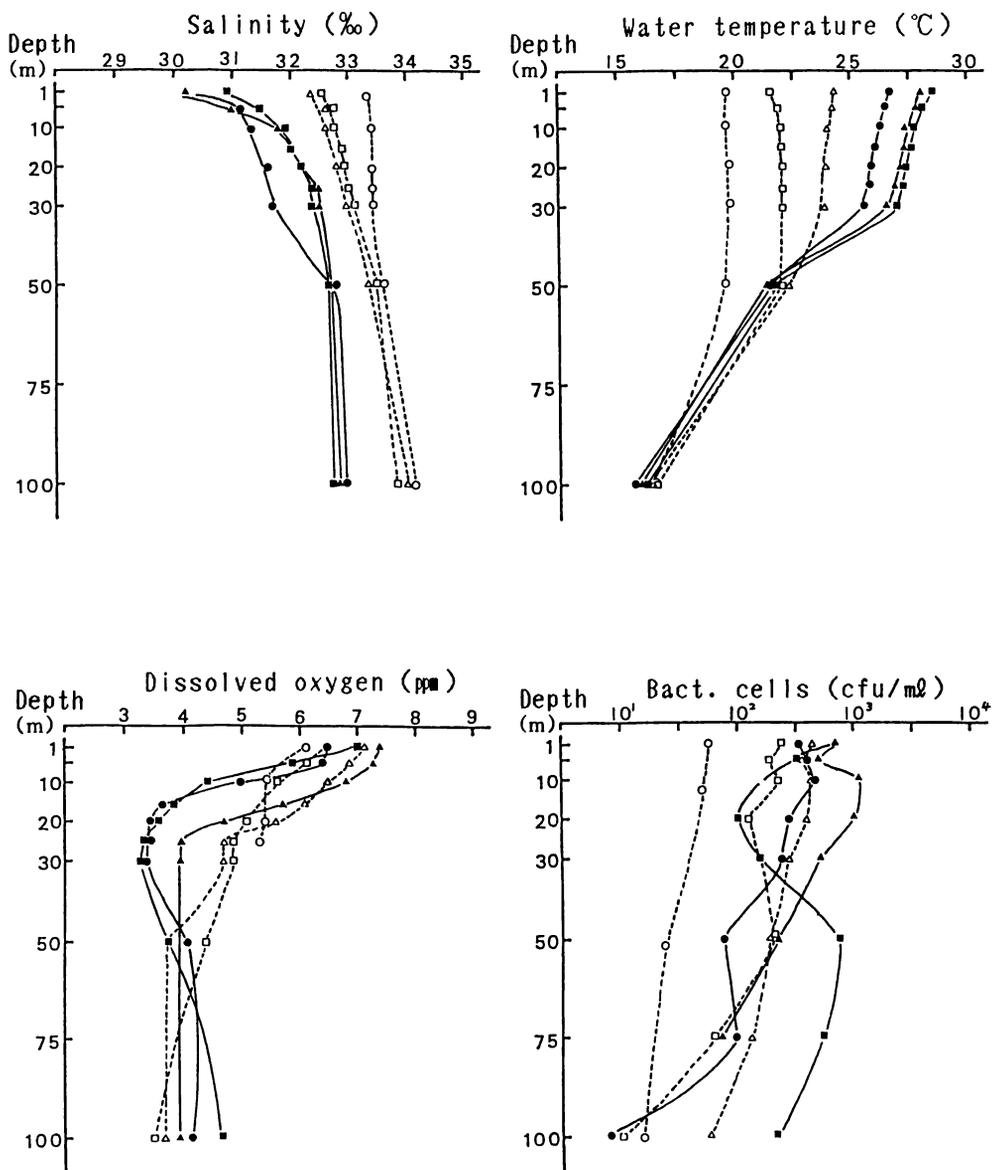


Fig. 6-(2). Vertical distribution of water temperature, salinity, dissolved oxygen, and bacterial cell count at St. 16, during September to November in 1986.
 ▲, Sep. 1; ■, Sep. 8; ●, Sep. 24; △, Oct. 15; □, Oct. 28; ○, Nov. 26.

の流入がなく、表層水の塩分低下が少なく、中層低酸素化傾向は弱い。このように湾奥部にあっても調査点によって中層低酸素化の状態は異なっていた。

St. 16 と St. 18 にあっては前年よりやや早く 9 月 1 日頃から中層低酸素現象の兆しがみられ、9 月 8 日、9 月 28 日にそれが顕著となり水深 20~30 m の中層で DO 3ppm の低酸素水塊が現れたが、10 月 15 日の調査時には終息した。またこの年のそれは前年よりやや深い層、25

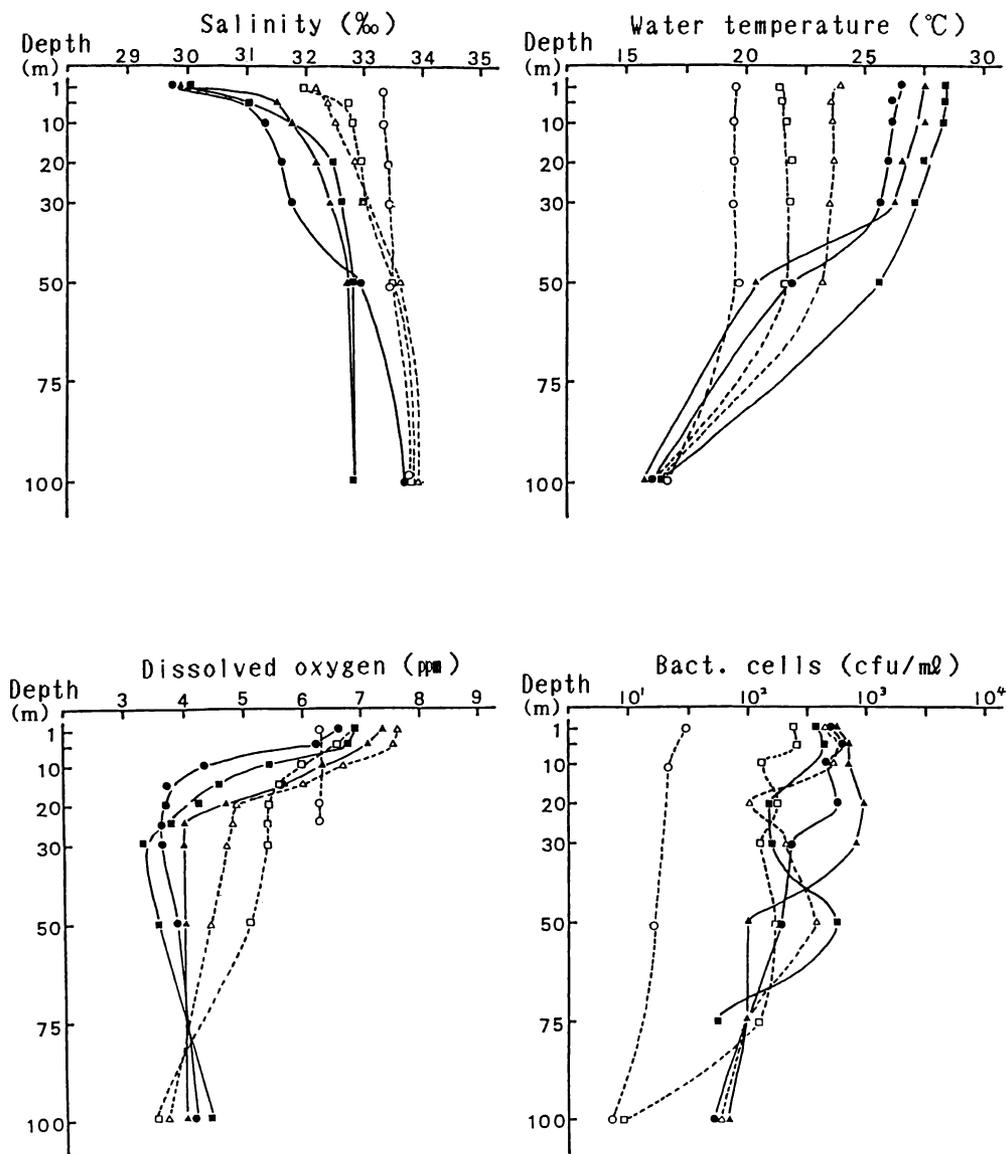


Fig. 6-(3). Vertical distribution of water temperature, salinity, dissolved oxygen, and bacterial cell count at St. 18, during September to November in 1986.
 ▲, Sep. 1; ■, Sep. 8; ●, Sep. 24; △, Oct. 15; □, Oct. 28; ○, Nov. 26.

~50m層に見られた。St. 21 においては St. 16, 18より遅れて10月にも中層低酸素状態が残っていた。その頃の水温、塩分は前年に認められたと同様な条件であることが確認できた。低酸素水域における細菌細胞数の増加は前年ほど顕著ではないが、中層低酸素現象出現期にそれが増えることは確かである。それらの細菌の大半は前年同様 *Vibrio* 属菌であった。

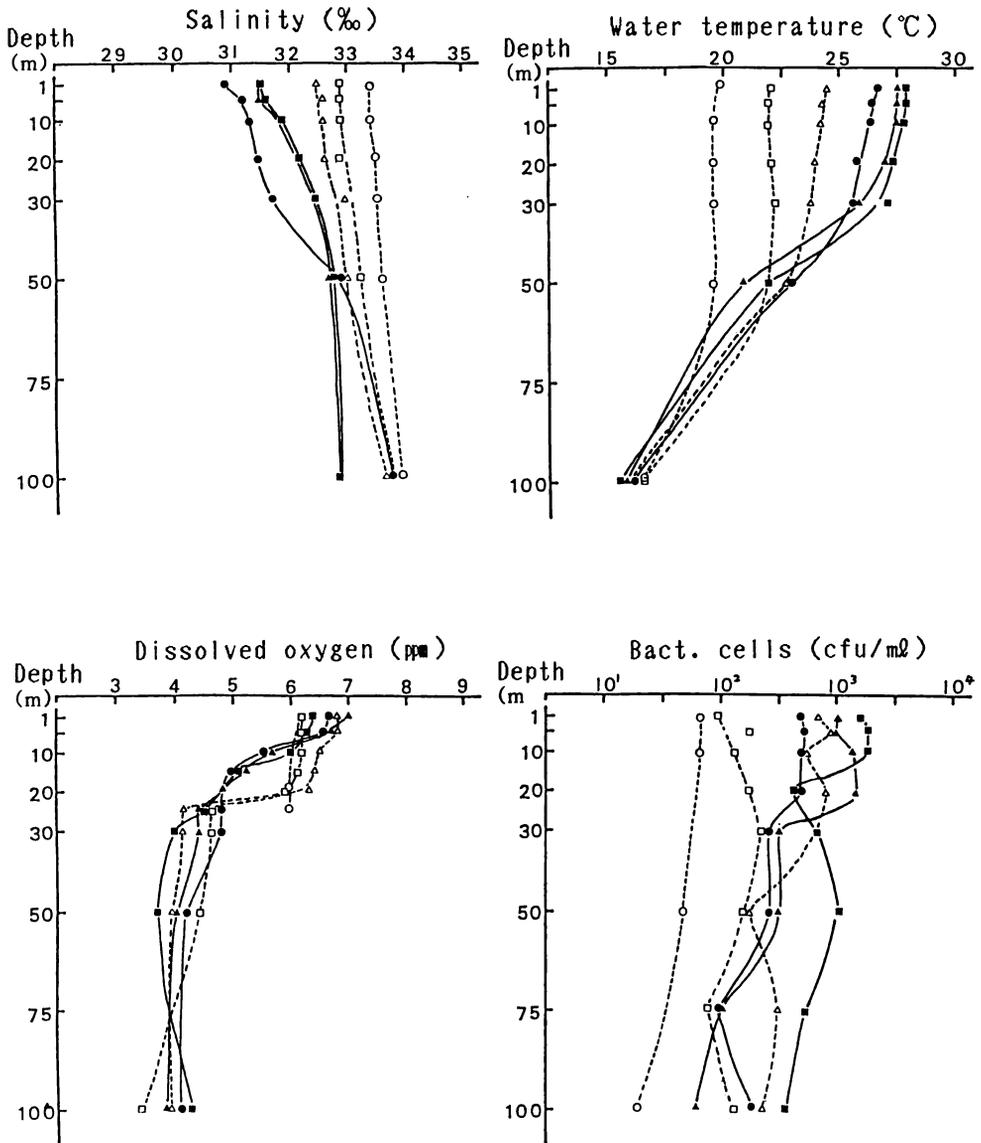


Fig. 6-4). Vertical distribution of water temperature, salinity, dissolved oxygen, and bacterial cell count at St. 21, during September to November in 1986.
 ▲, Sep. 1; ■, Sep. 8; ●, Sep. 24; △, Oct. 15; □, Oct. 28; ○, Nov. 26.

6. 1987年の再確認調査の結果

1987年の調査は前年の知見を再確認するため、1986年と同じ定点、同じ水深層を対象とした。調査は8月21日、9月18日、10月23日、10月29日の4回行い、それらの結果はTable 3-(1)～(4)に示すとおりである。中層低酸素現象を引き起こす要因として表層水の水温24℃以上、塩分32‰以下、細菌細胞数 10^3 cfu/mlを挙げたが、それらを基準としてTable 3-(1)～

Table 3-(1). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, August 21 in 1987.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%)* ⁵	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
11	58	7.4	1	28.0	29.4	8.3	8.4	122.2	4,000
			5						1,800
			10	26.8	33.2	8.2	6.0	87.0	860
			20	26.2	33.5	8.2	5.7	81.9	160
			30	21.1	33.5	8.0	5.1	67.5	200
			50	18.7	33.5	7.9	4.6	58.3	140
16	123	7.0	1	28.9	28.8	8.4	8.3	121.5	2,200
			5	27.9	30.8	8.3	7.7	112.1	360
			10	26.3	31.9	8.2	5.6	79.8	160
			20	26.2	32.7	8.2	3.8	54.4	100
			30	23.0	32.7	8.0	3.7	50.1	80
			50	19.7	33.4	8.0	4.5	57.9	120
			75	16.9	33.7	7.9	4.5	55.4	120
100	16.0	33.8	7.8	4.1	50.5	50			
18	140	8.0	1	29.9	29.1	8.4	7.8	116.5	1,600
			5	28.7	30.5	8.4	7.7	113.5	400
			10	27.7	31.4	8.3	7.6	110.7	250
			20	26.7	33.1	8.3	5.8	83.9	170
			30	21.6	33.1	8.0	4.1	54.4	120
			50	18.9	33.5	8.0	4.4	56.5	70
			75	17.0	33.7	7.9	4.4	55.3	58
			100	15.9	33.8	7.7	3.9	48.2	48
21	98	6.0	1	29.1	29.7	8.4	8.0	118.2	630
			5	28.3	30.5	8.4	7.9	115.6	1,000
			10	27.4	31.0	8.3	7.3	105.5	1,100
			20	26.6	32.6	8.3	4.0	57.6	270
			30	22.4	32.9	8.0	3.6	49.3	170
			50	20.3	33.3	8.0	4.2	55.1	270
			75	16.7	33.8	7.8	3.8	47.2	140
			100	16.0	33.8	7.7	3.8	46.7	260

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

(4)を通覧する。

Table 3-(1)は、8月21日の調査結果である。表層の水温は28~29°C、塩分は30‰未満、細菌細胞数は 10^3 cfu/ml以上であった。このような条件下で溶存酸素は沿岸に近い定点であるSt. 16, 21において水深20~30m層に典型的な中層低酸素状態が現れていた。

Table 3-(2)は9月18日の調査結果である。これも8月21日の結果と同様な傾向にあって、

Table 3-(2). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, September 18 in 1987.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT** ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO** ⁴ (ppm)	(%)* ⁵	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
11	55	6.0	1	25.1	31.4	8.2	6.7	93.2	3,800
			5						2,200
			10	25.1	31.9	8.2	6.0	83.9	1,900
			20	25.0	32.8	8.2	5.9	82.7	730
			30	25.0	33.1	8.1	5.8	82.4	600
			50	21.2	33.2	8.0	4.0	57.4	340
16	124	6.0	1	25.2	31.1	8.2	6.6	91.9	1,600
			5	25.5	31.5	8.2	6.0	84.3	1,600
			10	25.6	31.8	8.2	5.2	73.2	1,800
			20	24.8	32.3	8.1	3.7	51.5	1,100
			30	23.1	32.7	8.0	3.8	52.5	460
			50	20.6	33.2	8.0	4.0	52.6	260
			75	17.3	33.6	7.9	4.0	50.1	130
100	15.2	33.7	7.8	4.0	47.8	100			
18	141	5.0	1	26.1	30.9	8.3	7.0	98.9	1,100
			5	26.1	31.6	8.3	6.4	90.8	1,500
			10	25.9	31.7	8.2	5.8	82.1	1,700
			20	25.0	32.4	8.1	4.3	60.1	1,200
			30	23.4	32.7	8.1	4.6	63.8	630
			50	21.7	33.2	8.0	3.9	52.6	240
			75	17.1	33.6	7.9	3.4	42.2	110
			100	16.2	33.7	7.8	3.2	39.7	100
21	102	5.0	1	27.0	30.9	8.3	7.1	101.9	2,300
			5	26.5	30.9	8.3	7.1	100.9	2,300
			10	26.4	31.3	8.3	6.5	92.5	2,600
			20	24.7	32.4	8.1	3.8	52.9	880
			30	23.3	32.6	8.1	4.5	62.0	690
			50	21.1	33.2	8.0	4.0	52.7	340
			75	17.1	33.7	7.9	3.9	48.6	340
			100	16.4	33.7	7.8	3.7	45.6	370

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

St. 16, 21で低酸素現象が見られた。この所見での特徴は、細菌細胞数が水深1 mから20 m層に至る厚い層で 10^3 cfu/ml以上を示していることである。

Table 3-(3)は10月23日の調査結果である。表層の水温、塩分ともにかの条件を満たさず中層低酸素現象はみられなかった。

Table 3-(4)の10月29日の調査結果において、表層の水温は22.5℃と低いが、塩分、細菌

Table 3-(3). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, October 23 in 1987.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%)* ⁵	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
11	51	7.5	1	22.6	32.6	8.2	6.7	90.1	1,000
			5						600
			10	23.0	32.7	8.2	6.5	88.1	670
			20	22.9	32.8	8.2	6.3	85.3	680
			30	22.3	32.9	8.2	5.9	80.1	620
			50						
16	125	7.0	1	22.5	32.3	8.2	7.4	99.2	2,300
			5	22.5	32.3	8.2	7.4	99.2	690
			10	22.5	32.3	8.2	7.4	99.2	720
			20	22.6	32.6	8.2	6.0	80.7	910
			30	22.9	32.8	8.1	5.2	71.2	410
			50	21.9	33.1	8.1	4.6	61.6	360
			75	17.9	33.5	7.8	4.1	51.5	200
			100	16.4	34.0	7.7	3.7	45.3	150
18	142	6.5	1	22.6	32.3	8.2	7.0	94.0	530
			5	22.6	32.3	8.2	7.0	94.0	460
			10	22.5	32.3	8.2	6.8	91.1	550
			20	22.8	32.8	8.1	4.5	60.8	670
			30	22.7	32.8	8.1	4.9	67.1	380
			50	22.0	33.1	8.1	5.6	75.0	340
			75	18.4	33.4	7.9	4.6	58.3	240
			100	16.4	33.6	7.8	3.6	44.4	130
			130	16.2	33.6	7.7	3.8	47.0	

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

細胞数には条件を満たす部分もある。これは調査5日前、3日前に大量降雨があったせいであろう。しかしこの条件下で中層低酸素現象はみられなかった。

Table 3-(4). Experimental data of the seawater collected from various depths at the stations, October 29 in 1987.

Station No.	Depth (m)	Trans.* ¹ (m)	Sampling layer (m)	WT* ² (°C)	S* ³ (‰)	pH	DO* ⁴ (ppm)	(%)* ⁵	Bact. cell (cfu/ml)* ⁶
11	55	3.0	1	22.2	30.9	8.2	7.2	95.1	1,300
			5						3,600
			10	22.3	32.6	8.1	5.7	76.3	1,600
			20	22.4	32.7	8.1	5.6	75.1	1,300
			30	22.5	33.2	8.1	5.5	75.1	1,700
			50	22.5	33.2	8.1	5.3	72.1	550
16	120	3.0	1	22.7	31.8	8.3	8.2	110.1	640
			5	22.7	32.1	8.2	7.2	96.6	1,100
			10	22.7	32.6	8.2	5.1	68.7	940
			20	22.6	32.9	8.1	4.9	65.9	100
			30	22.7	33.1	8.1	4.3	58.1	280
			50	22.0	33.3	8.1	2.9	39.2	200
			75	18.3	33.6	7.8	2.9	37.2	130
100	16.7	33.9	7.7	3.0	36.9	280			
18	140	4.0	1	22.6	31.7	8.2	7.8	104.3	1,400
			5	22.6	31.9	8.4	7.2	96.4	880
			10	22.6	32.2	8.3	6.2	83.1	500
			20	22.8	32.8	8.1	4.4	59.4	550
			30	22.6	33.1	8.1	4.2	56.6	350
			50	21.8	33.2	8.1	4.2	56.1	220
			75	18.3	33.3	7.8	3.3	41.8	150
			100	16.8	33.5	7.7	3.2	39.8	120
21	100	3.0	1	22.3	31.9	8.2	6.6	87.9	2,500
			5	22.4	32.2	8.2	6.1	81.6	2,100
			10	22.6	32.5	8.2	5.3	71.1	770
			20	22.6	33.0	8.1	4.5	60.6	240
			30	22.5	33.1	8.1	4.2	56.7	330
			50	21.6	33.1	8.0	4.0	54.0	200
			75	17.7	33.3	7.8	3.1	39.3	130
			100	16.6	33.7	7.7	3.0	37.7	82

* 1 ~ * 6 : See Table 2-(1)

考 察

海水中における溶存酸素（DO）の分布は、生態学的に大きな意義をもっている。それはそこに生息する生物の種類によって、DO増加の方向にはたらくものや減少の方向にはたらくものもあるからである。またDO分布は水温や塩分、またそれらに関わる水塊の移動の問題とも関連して複雑な様相を呈する。養魚場海域では魚類の健全な生育のために、その海域のDOの多寡に一喜一憂するのが現状である。門脇ら^{7,8)}は浅海養殖漁場におけるDO分布を図形化して“養殖天気図”として表わし、漁場診断や給餌管理などに活用している。

本邦周辺内湾におけるDO分布の変動については多くの報告があるが、ここにその数例をあげる。伊勢湾⁹⁾は平均水深19.5m、最深部で40mである。そこでは4月下旬から5月上旬に底層でDO 4.2ppm以下の低酸素水塊が見いだされ、それは次第に発達して7月下旬には水深5～10m、あるいはそれ以浅まで及んだ。そこでは低酸素水塊の浮上とある種のプランクトンの大量増殖との間に密接な関係が知られている。大村湾¹⁰⁾は平均水深14.8m、最深部で20mである。ここでも低酸素化の進行は最深部海底水から始まりそれが拡大する。低酸素化の規模と進行とは年による変動がはげしい。それを概略して言えば、低酸素化現象は6月中旬から進行し、7月中旬には1.4ppm程度にまで低下し、8月に入り部分的に無酸素水となる。無酸素規模は経日的に拡大し、9月下旬に最大となる。中旬になると初秋の冷え込みから海水の鉛直混合が起こり急速に解消する。台風の接近が本現象を解消することはしばしば経験されて、強制攪はんが無酸素水の解消には最も効果的であると言われている。瀬戸内海燧灘¹¹⁾は平均水深18.6mと浅いが、8月には表層水温は30℃、底層水は22～23℃に過ぎず、水深7～8mのところ強い躍層を生じ、さらに底泥上2mぐらいに第2躍層が発生して底泥直上水と中層水との混合を妨げている。そのために底層水で貧酸素化しやすいとされている。この現象は夏にみられ、秋の循環期に入って上下の海水が混合するにつれて消滅する。

ところで鹿児島湾奥部海域に出現する低酸素水塊は、浅い内湾のそれとは異なり、前述のように水深140mのなかで深度10～50mの中層にみられる特徴的な低酸素化現象である。その中層低酸素現象について前章において記述した3年間にわたる調査によって得られた知見は次のように整理されよう。

鹿児島湾奥部海域にみられる中層低酸素現象は、湾中央部海域では現れず、それが湾奥部の強い閉鎖性と、停滞しがちな海況に関わりを持つ現象であることがわかった。湾奥部入口の西桜島水道は水深40m位と浅く、潮汐流による海水の水平流動や湧昇などによる海水の上下混合があり、そのような定点では中層低酸素現象は見られない。

湾奥部海域の中層低酸素現象は8月から10月にかけて、気象、海況の季節的変動過程の一時期に見られる一過性のものであって、11月には終息した。だが近年その期間が徐々に前後にのびる傾向が見られる。この現象が見られる時期は、この海域の循環期及び表層混合層形成の初期に相当する。また中層低酸素水塊の出現深度はその出現初期には水深10～25m層と浅く、後期には水深10～50m層と深まった。それは8月頃から生じた表層混合層が10月頃までに段々と発達してその範囲を深部へ広め、かつその混合層の底層部で低酸素化が進むため

と考えられる。

その頃の海水環境条件は、表層水温が24℃を下らず、細菌の増殖に好適な温度条件下にあり、また夏期に降り溜った雨水の流入によって、表層水の塩分濃度が32‰以下である。加えて、海水中の細菌細胞数の変動については日高¹²⁾の報告があるが、この時期のそれは $10^2 \sim 10^3$ cfu/mlであった。ところが中層低酸素現象が見られた時期及び海域では細菌細胞数が増加してその5～10倍に達した。このことは中層低酸素水塊の出現には細菌増殖という生物学的な現象が関連している事が窺える。すなわち、表層混合層ではそれら細菌の増殖に伴い酸素消費が増し、大気からの酸素の補給が乏しい深度において低酸素化するものと理解できる。この海域の海水中細菌相の主要菌属は *Vibrio* と *Pseudomonas* であり、それらの割合は季節によって異なり、春には *Vibrio* < *Pseudomonas*, 夏から秋にかけては *Vibrio* > *Pseudomonas*, 冬には *Vibrio* \approx *Pseudomonas* と変動する¹³⁾。この様な変動傾向から見ても中層低酸素化がみられる時期の優占菌は *Vibrio* であり、それらが低酸素状態の出現に大きな関わりを持つと考えられる。

中層低酸素状態出現と水温、塩分、細菌細胞数との関連についてまとめると、まず水温はかなり明確な規制因子であり、表層水温が24℃以上の条件下で中層低酸素化が現れ、その温度以下では見られなかった。次に、表層海水の塩分濃度が32‰を下る条件では低酸素現象が見られたが、それには水温条件の適合が前提となっていた。さらに、中層低酸素現象が見られたのは水温、塩分両条件が整い、かつ細菌細胞数が 10^3 cfu/ml以上のときであった。これらの条件は鹿児島湾奥部海域で中層低酸素現象の発生を予知する指標となろう。湾奥部の中層低酸素現象は各調査年、調査点においてその出現時期や強度に違いが見られる。一般に沿岸に近い定点で顕著な低酸素現象が現れ、それが潮汐流や風波、風向きなどの関わりによって沖合いへと広がる傾向が知られた。

なお、現場海水の酸素収支及びそれに関わる事項との関連などについては別報にゆずる。

ともあれ、鹿児島湾奥部は閉鎖性の強い内湾海域であって海水が停滞しがちであるという背景がある。その中で、気温の上昇や河川水流入の増加あるいは有機汚濁物質の負荷などが重なれば、中層低酸素状態は進行し長期化、あるいは拡大する可能性を秘めている。よって、そのような要因の中で少なくとも人為的な要因は極力排除するよう心がけねばならない。

要 約

鹿児島湾奥部海域における特徴的な中層低酸素水塊の発生機構を知る一環として、現場海域で透明度、水温、塩分濃度、溶存酸素量、pHの分布を1985年から1987年にわたって調査した。その海域において、9月から10月にかけて水深10～50m層に低酸素水塊(DO, 4 ppm以下)が現れた。その時期は循環期の初期、表層混合が始まる頃であり、その深度は表層混合層の底層部に相当する深さであった。その頃、海水の環境条件のうち表層海水の水温は24℃以上、塩分32‰以下、細菌細胞数 10^3 cfu/ml以上であって、それらの条件は中層低酸素現象の発生を予知する指標となろう。陸水の流入やプランクトンの繁殖等によって有機物濃度が増した表層混合層で、細菌が増殖して周辺海水中の酸素を消費する。水深10m以浅くらいでは大気からの酸素の供給によって補償されるが10m以深では酸素の補給がとどかず、表層

混合層の底層部に相当する深度で低酸素水塊を生ずるものと考えられる。

本研究の試料採取等の際し、多大のご支援・ご協力をいただいた本学練習船“南星丸”の柿本亮船長をはじめ乗組員各位に深謝します。

文 献

- 1) 高橋淳雄 (1977) : 鹿児島湾の水理。沿岸海洋研究ノート, 14 (1・2), 19-24。
- 2) T. Takahashi (1981) : Seasonal differences of the circulation processes in a coastal basin nearly closed by land. *Ocean Management*, 6, 189-200.
- 3) 高橋淳雄, 茶田正明, 竹内兼仁, 田代克憲, 吉田賢二 (1974) : 鹿児島湾における汚染進行に関する海洋自然環境について。鹿児島湾水域環境調査報告書, Pp. 6-84, 鹿児島県。
- 4) 村上彰男 (1977) : “沿岸の汚染—海をとりもどすために—”。Pp. 103-106 (築地書店, 東京)。
- 5) 西条八束 (1984) : 内湾の富栄養化。“内湾の環境科学”上巻 (西条八束編), Pp. 1-29 (培風館, 東京)。
- 6) N. R. Krieg and J. G. Holt (1984) : “Bergey’s Manual of Systematic Bacteriology” Vol. 1, Williams & Willkins, Baltimore.
- 7) 脇門秀策, 平田八郎 (1984) : 浅海養殖場における溶存酸素量の微細分布。水産増殖, 32 (2), 142-147。
- 8) 脇門秀策 (1989) : 養殖天気図による浅海養殖場の環境管理。水産増殖, 36 (4), 312。
- 9) 岩崎英雄 (1983) : 伊勢湾。“沿岸保全のための海の環境科学”平野敏行編 Pp. 324~342 (恒星社厚生閣, 東京)。
- 10) 飯塚昭二, 平山和次 (1983) : 大村湾。“沿岸保全のための海の環境科学”平野敏行編 Pp. 342~354 (恒星社厚生閣, 東京)。
- 11) T. Ochi and Takeoka (1986) : The anoxic water mass in Hiuchi-Nada. Part 1. Distribution of the anoxic water mass. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 1-11.
- 12) 日高富男 (1984) : 鹿児島湾における細菌分布の季節変動。鹿大水紀要, 33, 85-96。
- 13) 日高富男, 島津誠一郎 (1984) : 鹿児島湾内海水中の細菌属組成の季節変動。鹿大水紀要, 33, 97-105。