

香 川 大 学 農 学 部 紀 要

第 58 号

1992年10月

MEMOIRS OF FACULTY OF AGRICULTURE
KAGAWA UNIVERSITY

No. 58, October 1992

燧灘の化学環境特性と物質循環に関する研究

越 智 正

香 川 大 学 農 学 部

香川県木田郡三木町

FACULTY OF AGRICULTURE, KAGAWA UNIVERSITY

Miki-chô, Kagawa-ken, Japan

香川大学農学部紀要

第 58 号

1992年10月 発行

各研究室の業績を発表するため、本学部は“香川大学農学部学術報告”と“紀要”を発行している。この“紀要”は研究の完成した比較的長い論文を発表するために発行されている。既刊の標題は最後の i-v 頁に記載されている。“学術報告”および“紀要”の交換または寄贈については、香川県木田郡三木町 香川大学農学部 (〒761-07) あて照会されたい。

Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

No. 58, October, 1992

The Faculty of Agriculture, Kagawa University publishes “Technical Bulletin” (Gakuzyutu Hōkoku) and “Memoirs” (Kiyō), and latter contains extended treatises. The titles of each number of “Memoirs” are printed on the pages i to v inside back cover. Correspondence concerning the exchange of publications should be directed to Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-chō, Kagawa-ken, 761-07, Japan.

燧灘の化学環境特性と物質循環 に関する研究

越 智 正

Studies on the Characteristics of Chemical Environment and
the Recycling of Nutrient in Hiuchi Nada Sea Area

Tadashi Ochi

目 次

第1章 研究の目的と背景	
1. 1 研究の概要	1
1. 2 研究の背景	1
1. 2. 1 燧灘の地形学的特徴	1
1. 2. 2 過去の環境汚染に関する社会的諸問題	3
第2章 灘の化学環境特性とその変遷	
2. 1 灘全域の化学環境	6
2. 1. 1 目的	6
2. 1. 2 調査及び分析方法	6
2. 1. 2. 1 調査	6
2. 1. 2. 2 水質分析方法	6
2. 1. 2. 3 底質分析方法	8
2. 1. 3 結果	8
2. 1. 3. 1 水質環境	8
2. 1. 3. 2 底質環境	11
2. 1. 4 考察	12
2. 1. 5 要約	14
2. 2 東部海域の化学環境	15
2. 2. 1 目的	15
2. 2. 2 調査及び分析方法	15
2. 2. 2. 1 調査	15
2. 2. 2. 2 水質分析方法	15
2. 2. 2. 3 底質分析方法	18
2. 2. 3 結果	18
2. 2. 3. 1 水質環境	18
2. 2. 3. 2 底質環境	25
2. 2. 4 考察	29
2. 2. 4. 1 化学環境	29
2. 2. 4. 2 環境と生物との関係	32
2. 2. 5 要約	33

第3章 貧酸素水塊の生成と溶存酸素収支	
3.1 貧酸素水塊の分布	35
3.1.1 目的	35
3.1.2 調査方法	35
3.1.3 結果	35
3.1.4 考察	41
3.2 貧酸素水塊の成因と季節的消長	43
3.2.1 目的	43
3.2.2 調査方法	43
3.2.3 結果	43
3.2.4 考察	45
3.3 底層水の溶存酸素収支	48
3.3.1 目的	48
3.3.2 調査及び実験方法	48
3.3.3 結果	48
3.3.4 考察	51
3.4 要約	53
第4章 灘の窒素、リンを中心とした物質循環	
4.1 栄養塩の再生及び季節変化	54
4.1.1 目的	54
4.1.2 方法	54
4.1.3 結果	54
4.1.4 考察	58
4.2 底泥中のリン酸塩組成と溶出	60
4.2.1 目的	60
4.2.2 調査及び分析方法	60
4.2.3 結果	61
4.2.4 考察	64
4.3 栄養塩の循環	65
4.3.1 目的	65
4.3.2 方法	65
4.3.3 結果	65
4.3.4 考察	69
4.4 要約	71
第5章 水産生物相の変遷	
5.1 目的	72
5.2 調査方法	72
5.3 結果	72
5.4 考察	78
5.5 要約	80
第6章 総合考察	81
謝辞	83
参考文献	84

第1章 研究の目的と背景

1.1 研究の概要

燧灘は1965年頃から始まった高度経済成長期に、沿岸の化学工業、食品工業、紙・パルプ工業等の産業が著しく発達して、それに伴い海域の富栄養化、有機汚染もほぼ同時に進行した。そのため1960年代末期より藻場の消失、貧酸素水塊の形成、赤潮の多発などとともに魚介類の斃死、中高価格魚種の減少等もみられるようになった。

この頃から、特に瀬戸内海では漁場環境汚染が社会問題として重要視されるようになった。瀬戸内海全域にわたる大規模赤潮の発生もあり、瀬戸内海環境保全臨時措置法が1973年に制定され、尿尿の海洋投棄の全面禁止（1973年）、水質総量規制（1979年）、リン削減指導方針（1980年）などの対策がとられるようになった。その結果、この海域の化学的酸素要求量（Chemical Oxygen Demand, COD）の流入負荷は1980年頃から次第に軽減する方向に向かっている。窒素、リンの負荷量も産業形態の変化、無リン洗剤の普及により次第に減少しつつある。

しかし一方では、海底泥からの栄養塩の再生、溶出、及びそれに伴う植物プランクトンの増殖が海域のCODの増加をもたらすいわゆる海の内部生産の影響が注目されるようになった。従って海域へのCODや栄養塩の流出負荷を規制する一方で、浅海域における環境保全は物質循環系に依存した海自身の生物的、化学的機能に期待せざるを得ない面があり、問題解消にはさらに長年月の日時が必要であることが次第にわかってきた。

この間、著者は瀬戸内海の中でも特に内湾性の強い燧灘において富栄養化の過程、貧酸素水塊の形成機構、栄養塩の動態を明らかにする目的で調査、観測を行ってきた。本論文はこれらの結果をまとめたものである。

本章では燧灘の地形、海洋環境の概略について述べるとともに、研究を開始するに至った背景、すなわち海況変化、漁獲変動についてふれ、問題点を概観する。

第2章では、燧灘全域の水質環境と底質環境を明らかにし、富栄養化の実情について論議する。次いで燧灘の中でも特に流れが弱く、しかも1960年代後半から著しい有機汚染を受けた東部海域の水質及び底質の実情を明らかにするとともに底生生物の種組成についても言及する。

第3章では、東部海域で特に問題となった貧酸素水塊の実態を明らかにするとともに、その形成機構、酸素収支について検討する。

第4章では、東部海域における栄養塩の季節変化、リンの海底泥への蓄積、溶出速度に関する調査及び実験結果をとりまとめて、植物プランクトンによる有機物の生産と分解に伴う窒素、リンの循環について考察する。

第5章では東部海域を主漁場とする4つの漁業協同組合の漁獲資料をもとに1957年以降の水産動物等の変遷について概観するとともに海域の富栄養化とのかかわりについて考察する。

第6章では灘の環境変化をとりまとめるとともに、これらの化学環境変化と底生生物、水産動物等の変動とのかかわりについて総合的に考察する。そして今後の環境改善の方向について検討する。

1.2 研究の背景

1.2.1 燧灘の地形学的特徴

瀬戸内海は、図1に示すように西は豊予海峡及び早瀬瀬戸を通じて外洋につながっているが、両海域の最小断面積から考えて豊後水道から入る黒潮系の水の影響が大きい。また、東は紀淡海峡及び鳴門海峡を通じて外洋に接しており、ここでは紀淡海峡による内湾水と外洋系の水の交換が鳴門海峡より大きいとされている（柳、樋

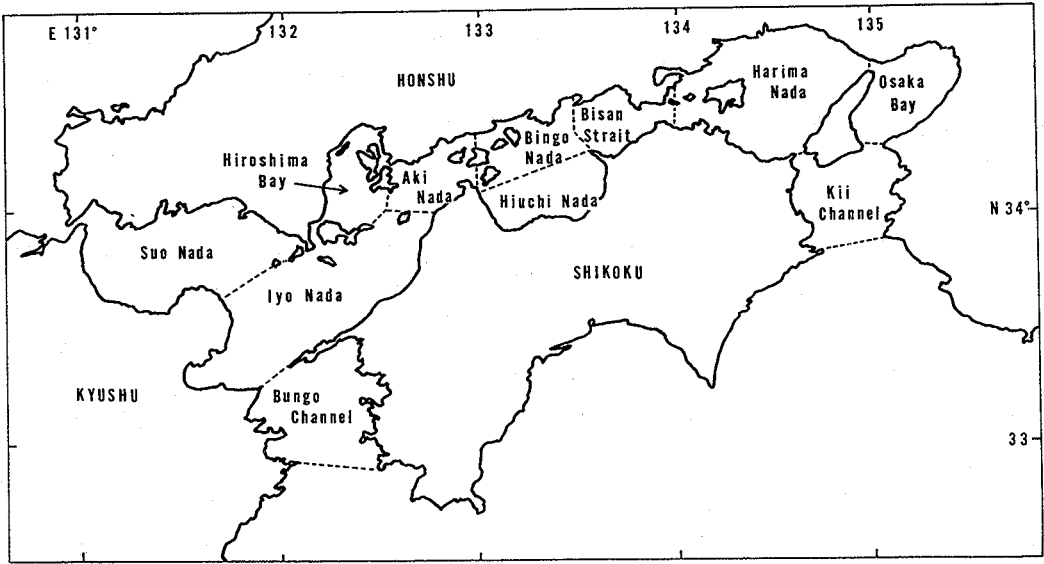


Fig. 1 Location of Hiuchi Nada in the Seto Inland Sea and the demarcation

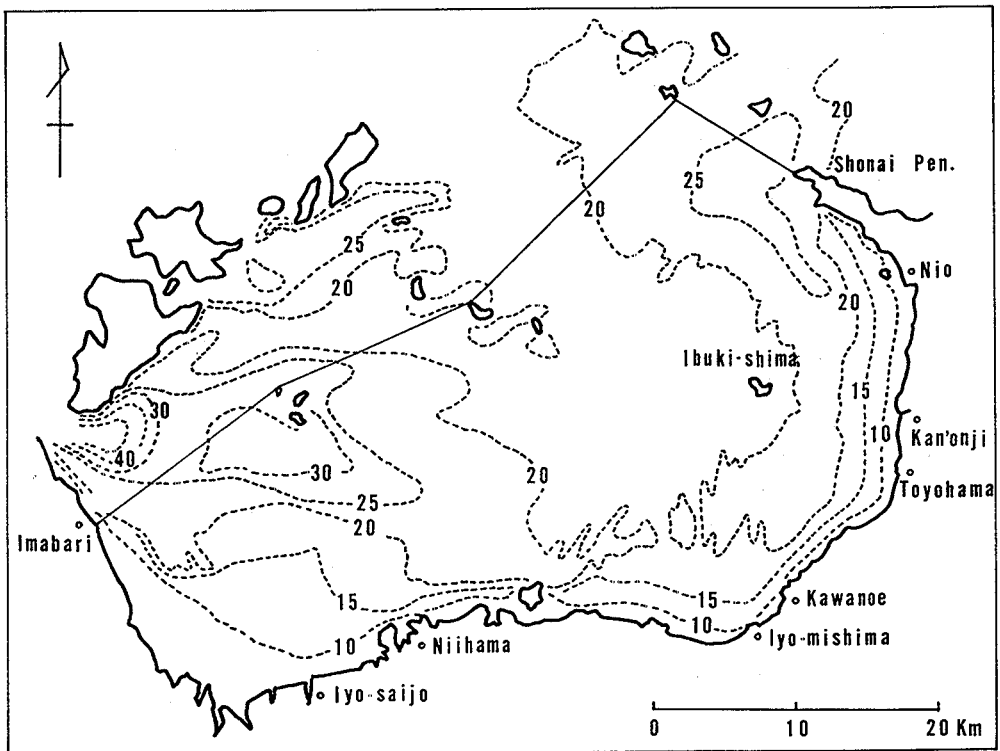


Fig. 2 Topographic map of Hiuchi Nada, sea area.

口, 1979; Imasato *et al.*, 1980).

瀬戸内海の水の交換は、1日2回の干満による水の出入りだけでなく、全体として西から東に向かう潮汐残流があり、研究開始当時は瀬戸内海の海水の交換に60年を要するともいわれていたが、最近の研究 (Takeoka, 1984) によれば、約15カ月程度とされている。

瀬戸内海の海域区分は漁獲統計や環境保全の立場により異なっている。燧灘についても北部の備後灘を含める場合もあるが、ここでは図2に示すように香川県の庄内半島から宇治島東端、高井神島北端、梶島北端を経て愛媛県今治市内を流れる蒼社川河口を結ぶ線の南側を燧灘海域とした。その理由は、比較的外洋性の強い伊予灘の水の大部分が安芸灘、備後灘を東進して備讃瀬戸に至ること、及び備後灘には大小多くの島々があるのに対し、南の燧灘は海岸線が単調で平坦な盆状の海域で海流が弱く、内湾性が強いために、上述の範囲を一応ボックスモデルとして扱うことができると考えたことによる。このような考えは1965年以降のIBP (国際生物事業計画) によっても示されている。

燧灘はほぼ瀬戸内海の中央に位置し、豊後水道系の海水と紀伊水道系の海水の潮汐波が離合する備讃瀬戸西部に隣接している。そのため干満による潮位差が大きく、大潮時には約4mに達する。海域面積は1,413 km²、平均深度17.8mで10~20mの深度に平坦面を有し、海岸の大部分には遠浅の干潟が発達している。

流入河川としては、伊予西条市内を流れる中山川 (317×10⁶ ton/yr)、加茂川 (317×10⁶ ton/yr)、新居浜の国領川 (212×10⁶ ton/yr)、観音寺の財田川 (146×10⁶ ton/yr) が主で、この他に伊予三島、川之江両市は銅山川から暗渠導水路を通じて180×10⁶ ton/yr を取水している。

1. 2. 2 過去の環境汚染にかかわる社会的諸問題

まず、燧灘で過去に起こった出来事を香川県三豊郡漁業組合連合会長小浜福重氏、豊浜漁業協同組合長植村与一氏の口述を基に年代を追って振り返ってみる。以下に示すような燧灘の歴史性の認識は、本研究の環境科学的意義を考察する際には欠かせない重要な要素である。

かつての燧灘は、種、量ともに豊かな“魚の宝庫”と呼ばれ、水産上重要な位置にあった。この燧灘の東部海域で海水や魚に異変が認められるようになったのは、1950年代中頃からである。まずはじめて海の異変に気づき、将来を憂慮したのは香川県三豊郡豊浜町豊浜漁業協同組合で、1955年に愛媛県紙パルプ工業会に対し、この異変は製紙排水のたれ流しによるものであるとして抗議している。一般漁民の目が明らかに異変を察知しはじめたのは1958年頃からで、海岸線に平行に帯状に繁茂していたアマモが枯れ始め、その後数年で姿を消し、次いで岩場に繁茂していたガラモも見られなくなった。ほぼ同じ頃、沿岸に設置していた定置網にカレイ類やメバルが異常に入ることが時としてあり、漁業者はそのような時には潮が黒ずんでいるのを見ている。おそらく潮流や風により黒色の硫化物を含む底泥が巻き上げられ、その結果生じた「苦潮」に底層魚が追われて沿岸におし寄せたものと推察される。

1960年代の後半から赤潮が多発するようになり、年をおって規模が拡大し、魚類の斃死を伴うようになった。また、燧灘に面する香川県下の沿岸水が製紙排水の影響で茶褐色になる日が増え、西風の強い日には場所により異臭を感じる程であった。1966年頃までに、ハマグリ、マテガイ、カガミガイ、バカガイのほとんどが死滅し、1968年にはイトマキヒトデ、クモヒトデなども認められなくなった。さらに、カマス、マダイ、インモチ、キューセン、タコなどが激減した。

1970年8月に本海域を台風10号が襲い、そのために海水が攪拌され、それまでに徐々に海底に蓄積されてきた有機汚染泥が巻き上げられ、海水が黒く濁った。そして養殖ハマチ22万尾、天然のボラ、クロダイ (チヌ)、クル

マエビなどが数百万尾も斃死したと報告されている。その時点で、燧灘に面する香川県漁民が伊予三島、川之江両市、愛媛県紙パルプ工業会に対し、廃液放流の即時中止、浄化施設の早期設置、漁業補償を要望した。しかし、製紙排水と漁業被害との因果関係が科学的に立証できていなかったために話し合いは物別れとなり、中央公害審査委員会へ調停申請を行った結果、1972年10月に調停が成立し、1億1千余万円の漁業補償が行われることになった。燧灘東部海域における貧酸素水塊の形成とそれに伴う魚類の斃死がみられるようになったのも1970年頃からである。

その後、1973年には製紙ヘドロの浚渫、埋立工事が開始されたが、その影響でトリガイが大量斃死して、漁業者の一部が、川之江市役所などに死んだトリガイをまき散らす事件も発生し、環境問題がさらに深刻になってきた。また、本海域で底曳網漁業を営んでいる漁民の間で手のひらが赤紫色にはれて、焼けるような痛みを訴える症状が発生したが、その原因については解明されていない。

このような事態のもとに次第に対策が講じられるようになり、1978年8月に環境庁及び香川県がそれぞれ独立して香川県豊浜町及び室本町の沖合いで底層の貧酸素水塊に空気を吹き込み、環境を改善しようとする事業を試みたが、見るべき効果はほとんど認められなかった。

以上のように燧灘東部海域の環境、生態系は短期間に大きく変貌してきたが、このような変貌をもたらしたのは、この沿岸における急速な用水型工業の発達が主要な原因と思われる。燧灘沿岸は工業用水に恵まれ、海上交通の利がある上に、遠浅の海岸で占められていたために、埋立によって工業用地を容易に造成することが可能であった。そのため古くから新居浜市には金属精錬や化学工業が発達し、また東予市、伊予西条市の沿岸にも繊維、食品、金属、化学工業などの工業団地が形成された。また、伊予三島、川之江両市は地場産業であった製紙工業がこの時代にさらに大きく発展した。

具体例として1960年と1975年の工場出荷額を比べると、パルプ・紙加工品は9.5倍、食品14.1倍、化学工業製品8.2倍と伸び、総出荷額は1975年に約6,800億円に達した。その反面、燧灘に面する愛媛県側の海岸線は大部分が埋立られて自然海浜が失われ、水族の産卵場、稚魚の養育場としての藻場が消失した（内海区水産研究所資源部、1967；南西海区水産研究所内海資源部、1974）。沿岸水は化学・肥料工場、食品工場からほとんど無処理で排出される工業排水や都市排水及び尿尿の海上投棄によって、加速度的に富栄養化が進行した。1971年当時、燧灘への負荷量は窒素22.6 ton/day、リン2.8 ton/day（村上、1975）であった。さらに紙・パルプ工場群からの有機排水は1970年には41万 ton/day、総負荷量はCOD 300 ton/day、浮遊固形物170 ton/day（村上、1971）に及び、本海域の有機汚染も著しく進行した。以上のように本海域は人為的な汚染負荷により、一時は死の海とさえ報道されるような状況に達していた。

このような汚染に対する直接的な対策はほとんど講じられなかったが、この頃から東京湾や瀬戸内海の汚染が政治的にも取り上げられるようになり、1970年に初めて水質汚濁防止法、次いで1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法がそれぞれ施行された。

これらの法規制によりまず尿尿投棄が1973年3月末で全面廃止となった。さらに燧灘に対するCOD負荷の約80%程度を占めていた紙・パルプ工場排水によるCOD負荷は1970年の300 ton/dayが、1977年には36 ton/dayにまで低下した。1979年には水質総量規制が導入されるようになり、ついで1980年からリン削減指導方針が出され、COD負荷のみならず、栄養塩負荷にも目が向けられるようになった。このような排水規制と肥料工業の他種目への転換などの産業形態の変化により燧灘東部海域は1980年頃からようやく赤潮の発生頻度の低下やその規模が小さくなったように見受けられるとともに、赤潮や酸欠による魚貝類の斃死が減少してきている。

燧灘東部海域を漁場とする香川県側の代表的な4漁協、すなわち観音寺、伊吹島、豊浜、仁尾の各漁協（正

組合員総数643人)について、1957年以降の漁獲量をまとめると、1957年より1965年までの9年間の年間の平均漁獲は約5,800 tonで安定し、魚種としてもマダイ、クルマエビ等がかなり漁獲されていた。それ以降、生産量からみれば増加が続き、特に1979年から1987年までの9年間に年間平均漁獲は18,000 tonに達し約3.1倍の伸びを示した。しかし、その内容をみればカタクチイワシの漁獲の伸びによるものがほとんどであり、1979年から1987年の間ではカタクチイワシが総漁獲量の81%を占めており、マダイやクルマエビなどについては第5章に述べるように1965年頃から激減したままで、漁獲量の増大が望ましい環境回復の徴候を示しているとはいえない。

本海域の特産とされていた小型のエビ類の漁獲はこの間に激減し、マダイ、チヌ、クルマエビ、カレイ類、タコ、サワラ、スズキ等ほとんどすべての中、高級魚が減少していったために、漁業生産性は他海域に比べて低下することになった。とはいえ、第5章に示すように、これまでの汚染負荷量の規制と、この間の種苗放流などにより1981年以降わずかにマダイやクルマエビの漁獲に回復の兆しが見え始めるようになってきた。

以上、燧灘での問題の経緯を概観してきたが、次章に入る前に、貧酸素水塊とはどのようなものか、概略を述べる。

沿岸域のうち特に内湾性の強い海域において底層水中の溶存酸素(Dissolved Oxygen, DO)濃度が低下し、水生動植物の生息に不適当な環境になることがしばしばみられる。瀬戸内海では大阪湾奥部、燧灘東部海域、広島湾などが顕著な例である。一般にDO飽和度が50%になると魚介類の幼稚仔の生育に影響が出はじめ、30%以下になると死滅するものが現れるといわれている。したがって貧酸素水塊が形成される海域では、生態系が大きく崩れるものと考えられる。貧酸素水塊の定義は確立されていないが、一般にDO 2.5 ml/l (3.6 mg/l)以下が採用されている(柳, 1989)。

貧酸素水塊が形成される海域の特徴としては、内湾性が強く潮の動きが弱いこと、陸水の流入により表面水の塩分が低下することや、夏季に表面水が暖められて、上下の海水の間に密度差を生じ安定な成層が形成されることなどがあげられる。このような海域に分解されやすい有機物を含む産業排水や都市排水などが多量に流入したり、また栄養塩類の負荷が高まり富栄養化が進行すると貧酸素水塊がしばしば観測されるようになる。この原因は大略次のように考えられる。

陸から流入した有機物や、海域で植物プランクトンによって生産された有機物は、やがて徐々に分解されながら沈降するが、内湾域は比較的水深が浅いために分解が終わらないうちに底層、あるいは海底に到達し、そこでさらに分解が進行する。この際に相当量のDOを消費するが、水平方向の流動が弱い内湾域では、それに必要な酸素の補給はもっぱら表層水からの拡散にたよることになる。しかしながら、安定な成層の発達する時期には、酸素の下層への拡散が躍層によって妨げられるために底層水の貧酸素化が進行し、時として無酸素水(DO濃度0)の出現も記録されている。貧酸素水塊の形成は、季節的には夏季に最も進行し、秋の循環期に入ると解消されていく。

燧灘では、最近、貧酸素水塊の発生は抑えられつつあるが、東京湾その他の内湾ではまだ重要な問題で東京湾に発生する青潮現象は貧酸素化の特殊な形態であり、世界の閉鎖性海域の富栄養化の進行が問題にされる現状では貧酸素水塊の形成は特に重要な課題であると思われる。

第2章 灘の化学環境特性とその変遷

2.1 灘全域の化学環境

2.1.1 目的

燧灘では1960年代後半から富栄養化の進行が大規模赤潮の発生、貧酸素水塊の出現という顕著な現象として浮かび上がってきた。本章では灘全域の水温、溶存酸素、クロロフィル、有機物、栄養塩、及び海底堆積物中の有機物、栄養塩等の分布を求め、本海域の海洋環境特性と富栄養化の現状を明らかにするとともに、特に社会問題となった東部海域の紙・パルプ工場排水による有機汚染の実態を把握することにした。

2.1.2 調査及び分析方法

2.1.2.1 調査

1969年9月、70年2月、6月、72年7月の計4回の調査観測点を図3に示す。燧灘に13定点を設けて広島大学水畜産学部実習船豊潮丸を利用して調査を実施した。また1981年6月には図4に示した22定点で調査を行った。採水は表層(0.5 m 深)、中層(5~10 m)、底層(底泥上1~2 m)の3層で行い、直ちに船上でワットマンガラスファイバーフィルター GF/C を用いて懸濁物と濾液にわけ、それぞれ分析に供した。81年の調査には同時に柱状採泥器を用いて堆積物を採取し、堆積物の表層(層厚1.5 cm)を分析に供した。合計5回の調査はそれぞれ分析内容が異なるので表1にその内容を取りまとめたて示した。

2.1.2.2 水質分析方法

溶存酸素(DO): 1972年までの調査ではウインクラー法によった。1981年の調査では米国 YSI 社製 DO メーター-58型を用いて測定した。

懸濁態有機炭素(POC)及び窒素(PON): 試水1 l をワットマンガラスファイバーフィルター GF/C で濾過して集めた懸濁物を柳本製作所製 CHN コーダー MT-2 を用いて測定した。

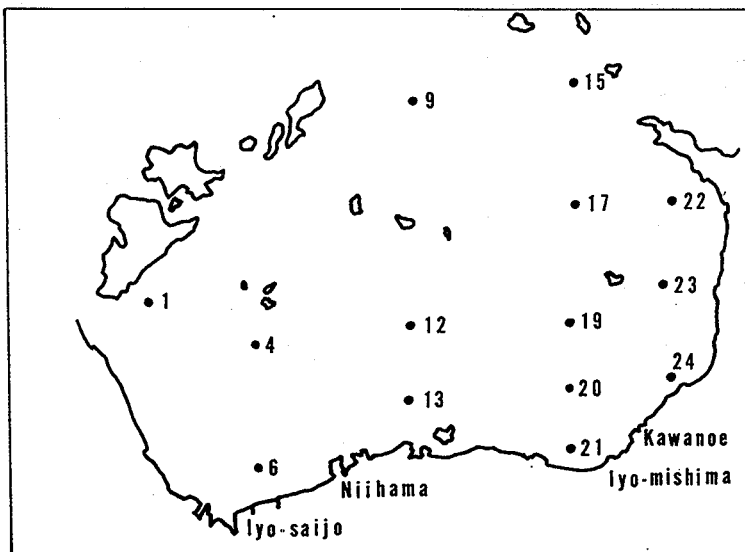


Fig. 3 Location of sampling stations during September 1969 to July 1972.

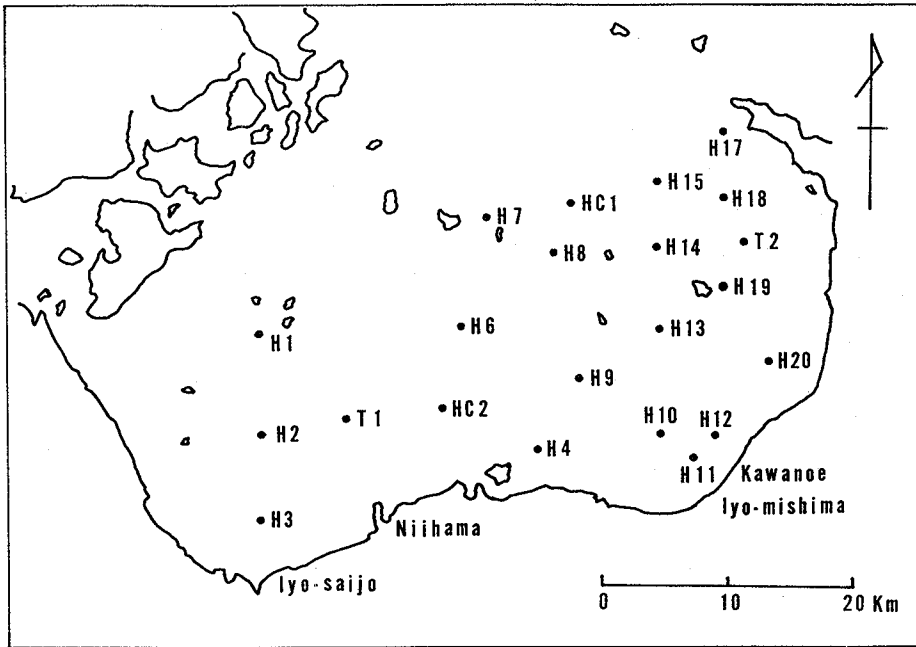


Fig. 4 Location of sampling stations in June 1981

Table 1 Analytical items of sea water and sediments collected between September 1969 and June 1981.

Observation date	Water analysis								Sediment analysis						
	DO	POC	PON	DOC	Chl a	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	PP	TP	Org.C	Org.N	TP	Pheo
Sep. 2-3, 1969	0	0	0	0											
Feb. 3-4, 1970	0	0	0	0											
Jun. 23-24, 1970	0	0	0	0											
Jul. 26-29, 1972	0					0	0	0	0						
Jun. 20-24, 1981	0	0	0		0				0	0	0	0	0	0	0

DO : Dissolved oxygen POC : Particulate organic carbon PON : Particulate organic nitrogen
 DOC : Dissolved organic carbon Chl a : chlorophyll a PP : Particulate phosphorus
 TP : Total phosphorus Pheo : Pheopigments

溶存有機炭素(DOC) : 濾過海水 5 ml をガラスアンプルに注入し、これに過硫酸カリウム 0.2 g 及び 3% リン酸 0.25 ml を加えた後、窒素ガスを 200 ml/min で 3 分間通気して、無機炭酸を除いた。次いでアンプルを封じ、オートクレーブ中で 125℃、1 時間酸化分解を行い、アンプル中に新たに生成した炭酸ガスを堀場製作所製赤外線炭酸ガス分析計 VIA-300 で分析した (Menzel and Vaccaro, 1964)。

クロロフィル a : 試水 1 l をグラスファイバーフィルター GF/C で濾過して集めた懸濁物から 90% アセトン 10 ml で色素を抽出し、ユネスコ法 (Strickland and Parsons, 1968) に基づいて測定した。

アンモニア態窒素 : インドフェノール法 (真鍋, 1969) により測定した。

亜硝酸, 硝酸態窒素 : Strickland and Parsons (1968) の方法によった。

リン酸態リン (IP) : アスコルビン酸を用いるモリブデンブルー法 (Murphy and Riley, 1962) による。

懸濁態リン及び全リン : 懸濁態リンは試水200 ml をグラスファイバーフィルター GF/C で濾別し、懸濁物に2%過硫酸カリウム10 ml を加え、120°C で30分間酸化分解した後、上澄み液についてモリブデンブルー法で分析した。全リンは無処理の試水50 ml に5%過硫酸カリウム10 ml を加え、沸騰水中で1時間煮沸、濃縮し、これを50 ml に定容してモリブデンブルー法により測定した。

2. 1. 2. 3 底質分析方法

有機炭素及び有機窒素 : 凍結乾燥泥0.5~1 g に2 N塩酸2 ml を加え、無機炭酸塩を分解後、真空デシケータ内で再び十分に乾燥し、これに酸化コバルト3 g を加えて柳本製作所製 CN コーダー MT-500により測定した (越智, 岡市, 1983)。

全リン : 凍結乾燥泥0.3 g に硝酸・過塩素酸 (1 : 1) 混液8 ml を加え酸化分解後、バナドモリブデン酸法 (関谷, 1975) により分析した。

フェオ色素 : 凍結乾燥泥0.5 g を90%アセトン10 ml で抽出し、上澄み液について分光光度法 (Moss, 1967 ; Lorenzen, 1967) により測定した。

2. 1. 3 結 果

2. 1. 3. 1 水質環境

1969年~70年に実施した3回の調査及び1981年6月の調査の結果を集計したものを表2に示した。1969年9月は平均水温25.9°Cと高いものの、表層と底層の水温差が0.4°Cであることから夏期の温度躍層が崩壊して間もない時期であったように思われる。70年2月は水温が最も低いときで上下の水温差もなく、よく混合している。70年6月は平均水温19.2°Cで上下の水温差が2.5°Cに達しており水深10m付近で成層の形成がかなり進行していた。以上のように3回の調査時の水塊構造は明かに異なり、それぞれその時期の燧灘の特徴を示していた。

このような状態の中での海水中の有機物濃度をまず POC でみると1969年9月は0.363 mg/l、70年6月は0.393 mg/l とやや高い値を示し、70年2月は少なく0.183 mg/l であった。DOC は同様に9月は1.55、2月は1.41、6月は1.80 mg/l で、2月に少なく6月に多い結果となった。共同調査を行った上野 (1972) の分析によるクロロフィルaについてみると、9月は2.33、2月1.50、6月12.42 µg/l であり、季節による差は POC、DOC よりも大きい。

次いで各調査について測点ごとにみることにする。

1969年9月における上下の平均水温差は前述のように0.4°Cで、底層でやや低い。東部海域の北方の測点17ではそれが1.1°C差で底層の DO は2.51 mg/l (飽和度35.2%) に低下していた。測点22, 23, 24においても飽和度が50%台に低下した。

POC が最も高いのは南東部の川之江市沖の測点24の表層で0.967 mg/l、次いで南西部の伊予西条市沖の測点6の表層で0.904 mg/l であった。DOC についても同様で測点24で4.41 mg/l、測点6で2.10 mg/l とかなり高い値を示した。

クロロフィルa が最も高いのは測点6で11.5 µg/l、次いで測点24の3.05 µg/l であった。測点6と測点24の表層水について POC/Chl a を求めるとそれぞれ79及び409となり、両者で大きく異なっていた。とくに測点24の POC/Chl a は異常に高く、測点の場所からみて、パルプ工場の排水の影響がうかがわれる。

70年2月の調査結果は全域で POC、DOC とともに低く、クロロフィルaも南東部沿岸の測点21で3 µg/l 台でや

Table 2 Average values of analytical results of sea water collected between September 1969 and June 1981

Date	Layer	WT °C	DO		POC μg/l	PON μg/l	DOC mg/l	Chl <i>a</i> μg/l
			mg/l	%				
Sep. 2-3, 1969 (n=13)	U	26.1(0.3)	6.89(1.16)	98.3(17.1)	419(247)	62(35)	1.77(0.82)	2.67(2.90)*
	M	25.9(0.2)	6.58(0.59)	93.6(8.5)	359(204)	53(30)	1.51(0.34)	2.37(2.21)*
	B	25.7(0.3)	5.12(1.30)	72.7(17.8)	311(90)	45(14)	1.38(0.20)	1.93(1.77)*
	Mean	25.9(0.3)	6.20(1.30)	88.2(18.7)	363(198)	53(29)	1.55(0.55)	2.33(2.37)*
Feb. 3-4, 1970 (n=13)	U	10.6(0.7)	9.44(0.35)	101.8(2.9)	141(58)	23(11)	1.28(0.19)	0.73(0.79)*
	M	10.2(0.6)	9.44(0.36)	100.4(2.9)	191(65)	28(10)	1.35(0.19)	1.58(0.71)*
	B	9.5(0.5)	9.42(0.40)	105.0(3.4)	216(50)	38(10)	1.61(0.26)	2.19(0.74)*
	Mean	10.1(0.6)	9.43(0.37)	102.4(3.1)	183(59)	30(11)	1.41(0.23)	1.50(0.76)*
Jun. 23-24, 1970 (n=13)	U	20.4(0.7)	9.15(2.44)	117.1(31.2)	666(653)	124(123)	2.34(1.51)	15.36(9.76)*
	M	19.2(0.5)	7.19(0.66)	97.4(8.9)	288(160)	61(44)	1.59(0.21)	11.72(6.59)*
	B	17.9(0.9)	6.27(0.70)	83.7(9.7)	226(121)	53(39)	1.46(0.33)	9.98(5.53)*
	Mean	19.2(1.2)	7.85(1.82)	99.4(23.9)	393(440)	79(85)	1.80(0.98)	12.42(7.88)*
Jul. 26-29, 1972 (n=12)	U	24.7(0.5)	6.77(0.49)	92.8(6.9)				
	M	24.2(0.3)	6.69(0.29)	91.0(4.0)				
	B	22.9(0.4)	5.49(0.77)	73.2(10.6)				
	Mean	23.9(0.9)	6.31(0.81)	85.7(11.7)				
Jun. 20-24, 1981 (n=22)	U	22.7(1.2)	7.8(0.6)	93(4)	314(105)	34(17)	1.50(0.26)	4.2(2.6)
	M	18.0(0.6)	7.3(0.7)	88(5)	234(66)	24(9)	1.20(0.14)	3.2(1.7)
	B	17.0(0.7)	6.1(1.0)	72(12)	309(98)	35(14)	1.16(0.12)	4.2(2.4)
	Mean	19.2(2.6)	7.1(1.1)	84(12)	285(99)	31(15)	1.28(0.24)	3.9(2.3)

U: Upper layer M: Middle layer B: Bottom layer (): Standard deviation

*: quoted from Uyeno(1972)

や高いほかは全体的に少なく、また、測点間の差異はほとんど認められなかった。DO はほぼ飽和状態であった。

70年6月の調査では多くの観測項目について測点間の差が大きく現れた。上下の水温差についてみると灘の中西部海域では1.8℃以内であるが、東部海域では2℃以上で、特に測点17では5℃に達しており、東部と西部で水塊構造に大きな差のあることが示唆された。

POC は平均0.393 mg/l であったが、伊予西条沖の測点6で1.88 mg/l、東部の測点22から24にかけては0.88から2.11 mg/l と南方沿岸部で増加傾向が認められた。他の測点では0.40 mg/l 以下で、それほど高くはなかった。DOC は測点6, 22, 23, 24において2.0 mg/l を超えているが、特に伊予三島、川之江両市に近い測点24では表層水で7.15 mg/l を記録した。この値は本研究期間の最高値であり、沿岸水としても異常に高く、陸水の流入による影響をうかがわせた。クロロフィル *a* は測点12の表層が最低で1.78 μg/l、最高は測点6の表層で実に52.9 μg/l を記録した。DO は東部海域の底層で70~80%飽和とやや少なくなっており、この時期にすでに貧酸素化の兆しを示した。

1972年7月26~29日に実施した調査によれば、この時点で水温も上昇しており、表層で24.7℃、底層22.9℃が観測され、上下の水温差が1.9℃で、海域により成層化が認められた。特に伊吹島の周辺で水深が20mを超える海域で著しく、測点17では上下の水温差が3.1℃に達していた。それと同時に貧酸素化も起こっており、測点17の底層水の DO 飽和度は52.4%にまで低下していた。

その後約10年を経過した1981年6月20~24日に、燧灘全域に22測点(図4)を設けて調査を行った。その結果を図5に示した。灘の北西部の表層水温は約21℃であるが南東部に向かって徐々に上昇し24~25℃に達してい

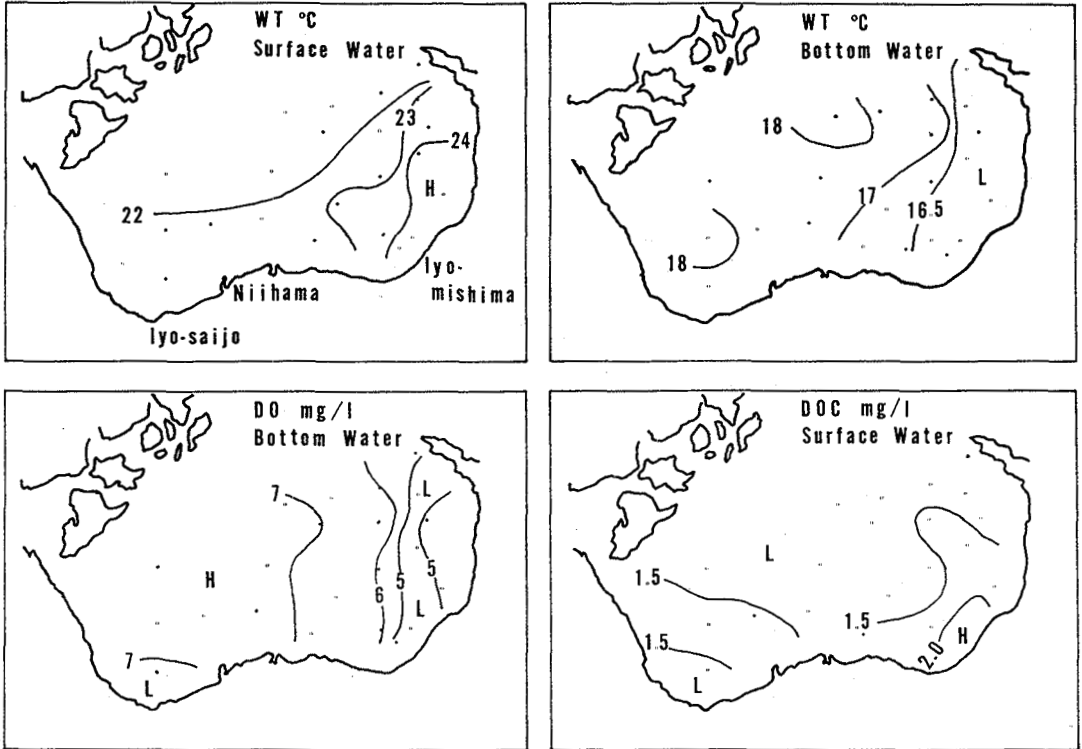


Fig. 5 Distribution of water temperature, DO and DOC in June 20-24, 1981.

る。一方、底層水温は西部海域で高く17.5~18℃であるが、東部海域は16~16.5℃を示し、表層水温と逆の現象が認められ、従って上下の水温差は西部で3~5℃と小さく、東部に向かって大きくなり測点H19で8.7℃を記録した。平均塩分は表層水で31.89、中層水32.46、底層水32.50であり、上下の塩分差は0.61であった。水温と塩分の平均値から表層水と底層水の密度差に寄与する割合を比べると水温(3)に対し塩分(1)の割合で、主として水温がきいていることが明かである。表層水中のDOは調査の10日前から曇りまたは雨天続きで基礎生産が抑えられていたために7.6~8.6 mg/l (70~80%)とやや低い範囲にあり、海域による差異は認められなかった。底層水中のDOは伊予西条市沖の一部を除くと西部海域では7 mg/l以上であったが、中部、東部に向かって減少し、測点H18で最低4.4 mg/l (39%)を記録した。表層水と底層水のDOの濃度差は西部海域では0.7 mg/l以下であるが、東部海域は2.1 mg/l以上であり、伊吹島東部の測点H19で4.1 mg/lに達した。以上のように6月下旬の時点で既に貧酸素化の傾向を示すとともに、表層と底層の水温差が大きい海域でDO濃度が低い傾向が顕著に認められた。

POCは海域、水深による差異はほとんど認められず、0.2~0.4 mg/lの範囲にあったが、伊予三島市沖の測点H11、H12の表層水に0.51及び0.57 mg/lとやや高い値が検出された。表層水中のDOCは灘中央部においては1.2~1.4 mg/lであるが、西部及び東部海域では1.5 mg/lを超えるやや高い海域が認められ、特に伊予三島、川之江両市地先の測点H11及びH12において1972年よりは減少しているものの2 mg/l以上が検出された。底層水中のDOCは表層水に比べて少なく、大部分の測点は1.2 mg/l以下であった。ただ、西部海域の測点H1、H2、T1で1.3~1.5 mg/lとやや高い傾向が認められた。クロロフィルaの測定結果によれば、表層水は平均4.2 µg/lで、伊予西条及び伊予三島市地先沿岸水に6 µg/lを超えるものがあったが、沖合部ではほとんど変化

Table 3 Average concentration of nutrients in sea water collected in July 1972 and June 1981

Date	Layer	NH ₄ μ M/l	NO ₂ μ M/l	NO ₃ μ M/l	Urea μ M/l	PO ₄ μ M/l	TP μ M/l
July 26-29, 1972	U	1.61(1.15)	0.06(0.07)	1.22(2.12)	1.21(0.72)	0.18(0.18)	
	M	1.35(0.71)	0.09(0.07)	0.64(0.91)	1.77(1.30)	0.13(0.08)	
	B	1.93(0.75)	0.94(0.71)	1.80(1.44)	2.38(1.70)	0.41(0.18)	
	Mean	1.63(0.92)	0.36(0.58)	1.22(1.64)	1.79(1.39)	0.24(0.20)	
June 20-24, 1981	U					0.10(0.06)	0.38(0.09)
	M					0.15(0.09)	0.45(0.08)
	B					0.35(0.15)	0.77(0.24)
	Mean					0.20(0.15)	0.53(0.23)

Refer to Table 2 for U, M and B.

はみられなかった。底層水についても平均4.2μg/lを検出したが、伊吹島北方の測点H14, H15, H18を含む海域で9~10μg/lと高濃度に検出されたのが特徴的であった。

1972年7月と1981年6月に栄養塩を分析した結果を表3に示した。

1972年のアンモニア態窒素は平均1.63μM/lで、概して底層水中に多い傾向がある。しかし、測点6の表層で3.97μM/l、測点24の表層で2.54μM/lが測定され、他の測点と逆の傾向が認められた。亜硝酸態窒素は表、中層ともに低く、平均値で0.06及び0.09Mg/lであったが底層水中では高く測点17で2.49μM/lを記録し、平均値は0.94μM/lであった。硝酸態窒素は測点6の表層水で7.94μM/lが得られたが一般に低く、平均1.22μM/lであった。無機三態窒素を集計すると表層、中層、底層水の平均値はそれぞれ2.89, 2.08, 4.67μM/lとなりやや底層水中の濃度が高い傾向が認められた。

無機態リンについては、測点6の表層水で0.49μM/l、測点24の表層水で0.67μM/lと高いものの、他は低く表層水の平均値は0.18μM/lである。中層の平均はやや低く0.13μM/lであったが、底層のそれは高く0.41μM/lとなった。特に底層のDOが少ない測点17で0.71μM/l、測点19では0.67μM/lが検出された。

1981年の調査ではリンについて分析した。無機態リンは一般に表層水中に少なく、平均0.10μM/lで、海域による差は認められなかった。一方、底層水は平均0.35μM/lが検出された。特に伊吹島北方の測点H15, H18, H19及びT2において0.5μM/l以上が検出された。表層水中の全リンは平均0.38μM/l、底層水中のそれは0.77μM/lであった。底層水中に全リンが多いのは特に東部海域で、無機態リンの分布とはほぼ一致し、最高は測点H14で1.47μM/lが検出された。

2. 1. 3. 2 底質環境

燧灘の底泥は沿岸の浅場及び来島水道に近い海域を除くと微細粒子からなる灰青色ないし黒色の軟泥であった。

1981年6月における有機炭素、有機窒素、フェオ色素及び全リンの分布を図6にそれぞれ示した。灘の西半分と東半分でかなりの濃度差が認められた。すなわち西部海域の有機炭素は15mg/g以下であるが、東部海域はほとんどの測点で15mg/gを超え、特に伊予三島、川之江市の地先と伊吹島の北部に高い海域が分布している。有機窒素についても有機炭素とほぼ同様の分布を示すが、伊予三島、川之江市の地先だけは有機炭素が多い割には窒素が低い傾向を示した。C/Nを求めると平均7.8であるが、伊予西条市と伊予三島、川之江市の地先海

域は8を超え、測点H11で最高9.4となった。フェオ色素は平均30.3 μ g/gであり、図6に示すように有機炭素とはほぼ同じ分布がみられた。フェオ色素を多く含む東部海域の中でも北部は特に多く、測点H18で最高51 μ g/gを記録した。フェオ色素に対する有機炭素の割合は平均520となるが、西部に比べて東部海域はその比が小さく500以下となった。全リンの分布は図6に示すように灘の北東部で高く、最高1.0 mg/gを記録した。

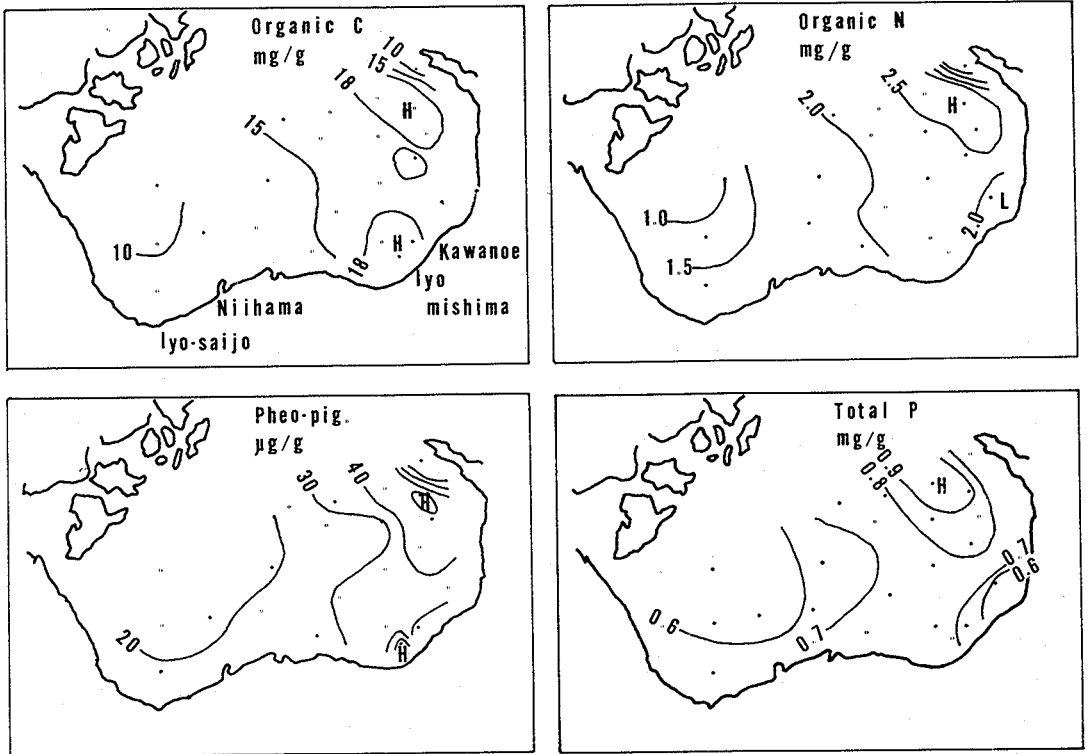


Fig. 6 Distribution of organic carbon, organic nitrogen, pheopigments and total phosphorus in sediments collected in June 20-24, 1981.

2. 1. 4 考 察

1969年から70年にかけて3回の調査を行い、DO分布と共に主として懸濁有機物について分析を行った結果、調査の時期によりかなり大きな変動がみられた。

1969年9月の調査では上下の水温差が大きくないにもかかわらず、底層水中のDOが35.2%にまで低下している測点もみられることから一度成層が崩壊した後、好天に恵まれ再度成層が形成され始めた時期にあったと思われる。70年2月は循環期にあり、70年6月は成層がかなり進行していた。

POCはいくつかの例外はあるものの1969年9月は約0.36 mg/l以下、70年2月は0.18 mg/l以下、70年6月は0.39 mg/l以下であり、富栄養化海域としては少なく、変動も大きくはなかった。一方、クロロフィルaは69年9月は3 μ g/g以下、70年2月は2 μ g/g以下、70年6月は15 μ g/g以下となり、POCに比べて変動が大きい。伊予西条市沖の測点6及び川之江市沖の測点23, 24ではPOC、クロロフィルaが他の測点の数倍大きい値を示し

た。そこで POC/Chl *a* 比が特別に大きい値を示す測点23, 24の測定値の一部を除いて、海水中の POC とクロロフィル *a* の回帰直線を求めた結果、次の関係式がえられた。

$$69年9月 \quad POC = 65.8 (Chl a) + 197 \quad (n = 37, r = 0.898)$$

$$70年2月 \quad POC = 41.1 (Chl a) + 117 \quad (n = 36, r = 0.625)$$

$$70年6月 \quad POC = 32.7 (Chl a) - 64.7 \quad (n = 36, r = 0.804)$$

69年9月の測点24のクロロフィル *a* は3.05 $\mu\text{g/g}$ であったからこれから推定される POC は0.40 mg/l となる。しかし、実測値として0.97 mg/l がえられており、POC の約6割はいわゆるデトライタスで、その中に、人為的に排出された有機物が含まれる可能性が考えられた。また同様に70年6月の測点24のクロロフィル *a* と POC はそれぞれ28.2 $\mu\text{g/g}$ 及び2.11 mg/l であり、この場合も4割が植物プランクトン由来の有機物で他はそれ以外の有機物ということになる。なお、測点23, 24においては POC と同様に DOC も異常に高くなっていた。

岡市 (1973) が1972年に伊予西条市の沿岸でアンモニア態窒素620 $\mu\text{M/l}$ を、また同時に新居浜市の化学肥料工場の排水中に実に6,500 $\mu\text{M/l}$ のアンモニア態窒素と61 $\mu\text{M/l}$ の尿素態窒素を、また全リン52 $\mu\text{M/l}$ を検出している。肥料工場からの排水量を245,000 ton/day として排出量を求めると窒素は6.7 ton/day, リンは0.12 ton/day となり、燧灘への窒素負荷量22.55 ton/day, リン負荷量2.8 ton/day (村上, 1975) のそれぞれ30%, 4%に相当する。従って燧灘の南西部海域の富栄養化の要因の一つは化学肥料工場の排水に由来するものと思われる。一方、南東部の伊予三島、川之江市の沿岸域は富栄養化と同時に紙・パルプ工場排水に由来する懸濁態及び溶解態有機物によって汚染されていることが明らかである。

西部海域に比べて東部海域では水温上昇期に上下の水温差が大きくなることが確認された。西部海域は来島海峡からの強い海流の影響を受けて海水が混合され成層が形成されないが、一方東部海域は北部を東西に流れる備讃瀬戸の海流の直接的な影響を受けることもなく、半閉鎖的で停滞性の強い海域である。そのため海流も弱く成層が形成されやすいと考えられる。また東部海域の中でも伊吹島の東部に南北に延びる海溝部分の底層水の動きが特に弱いためにこの海域に成層が形成されやすく底層水中の DO が減少するものと思われる。

1981年6月の調査結果によれば70年6月に比べて POC, クロロフィル *a* がかなり減少しており、その変動幅も少なくなっている。また、栄養塩濃度もやや低くなっていることから、排水規制の効果が徐々に現われているように思える。ただ、依然として高水温時の底層水の DO 濃度が低く、栄養塩濃度が高いことも明らかであり、特に貧酸素化によって底泥からのリンの溶出が促進されていると思われる。

1982年の別の調査結果について AOU (Apparent Oxygen Utilization) とリンの相関を求めた結果によれば酸素とリンの原子比は500:1で、一般に考えられている276:1から大きくはずれていた。

底質は水質に比べて直接的に汚染を受けることは少なく、変化はゆるやかであるが、一度汚染を受けると回復が困難であり、海域の汚染の歴史を保存していると考えられる。燧灘の底泥は西部海域と東部海域で明らかに異なり、東部で有機物濃度が高いのが特徴的である。特に伊予三島、川之江市の地先と伊吹島の北方海域でそれが著しい。前者は表層水中の DOC が高いこと、及び底泥中の有機炭素濃度が高い割には有機窒素、全リンが少ないことより、紙・パルプ工場排水の影響を受けていると考えられる。一方、伊吹島北方海域は有機炭素、有機窒素、フェオ色素、全リン等がいずれも高いが、この海域に隣接する陸域には大きな産業もなく、人口も多くないことから他の海域から運ばれたとしか考えられない。既に Uyeno (1977) が指摘しているようにプランクトンの死骸、その他の懸濁物の沈降集積域となっているように考えられる。すなわち、一つには南部の製紙工業地帯

からのセルロース、ヘミセルロース、もう一つは内部生産された植物プランクトン由来の有機物が伊吹島環流（第六管区海上保安本部，1973）と呼ばれる伊吹島を中心とする反時計廻りの潮汐残渣流によって徐々に移動し、この海域で最も深く、潮流の弱いところに集積したものと考えられる。

本海域の底泥中の有機炭素濃度と COD の間には

$$\text{Org C (mg/g)} = 0.717 (\text{COD mg/g}) + 1.3$$

の関係が認められていることから（岡市ら，1981），今回の有機炭素濃度を COD に換算してみると一番高いところでも 27 mg/g であった。1970年頃には東部海域に 30 mg/g を超える海域が 30 km² もあった（村上，1971）ことから考えると 30 mg/g を超える海域は伊予三島市地先に限られ約 10 km² 程度に減少したと思われ、徐々にではあるが有機汚染が軽減されていることが明らかである。

以上、栄養塩濃度からみれば 1970年頃は吉田（1977）のいう富栄養化域の範ちゅうに入るが、クロロフィル a 濃度は夏期に 10 μg/l を超え、底層水中の DO 飽和量が 30% 未満、底泥の COD が 25 mg/g 以上、全硫化物が 0.3 mg/g 等から判断して過栄養域と考えられる。1981年の調査によればクロロフィル a が減少しており、底泥の COD にやや低下が見られることから 1970年当時と比べて幾分、水質及び底質が回復の方向にあるものと推察された。

2. 1. 5 要 約

燧灘において富栄養化及び有機汚染が最も進行していたと思われる 1969年 7月 から 72年 7月 にかけて 4 回の水質調査を実施した。更に瀬戸内海環境保全臨時措置法が施行されてから 8 年を経過した 1981年 6月 には水質と底質の調査を行った。

1970年前後はクロロフィル a 濃度が平均 10 μg/g を超えることもあり明らかに灘全体で富栄養化が進行していた。栄養塩濃度そのものは東京湾や大阪湾に比べてそれほど高くはなかった。1980年代に入ってからクロロフィル a 濃度は低下しており水質改善の傾向がみられた。東部海域の底泥は西部海域のそれに比べて有機炭素、フェオ色素等が高濃度に検出された。

燧灘の主な汚染負荷として、中西部沿岸の伊予西条、新居浜両市からの工業排水、特に肥料工場からの窒素負荷が大きいこと、もう一つは伊予三島、川之江両市にまたがる紙・パルプ工場群からの有機物負荷が著しく大きいことが注目された。

夏季における表層水と底層水の温度差は西部海域に比べて東部海域で大きく、東部海域の停滞性が強いことが示唆され、これが貧酸素水塊形成の物理的要因の一つと推察された。

2.2 東部海域の化学環境

2.2.1 目的

綾灘全域調査により、特に東部海域の有機汚染が問題となったことを踏まえ、東部海域の汚染の実態を更に明らかにすると共に、1978年以降は特に、今後の水産増殖を図るための問題点を探ることを目標に、沖合部の汚染が海岸線に近い沿岸部にどのような影響を与えているのか詳しく調査した。さらに底泥の粒度組成と汚染との関係を調べると共に、香川県と協力して底生生物についても調査と実験を行ったが、これらについては考察を加えるにとどめた。

2.2.2 調査及び分析方法

2.2.2.1 調査

1970年10月22日に2隻の調査船を使用し、図7に示す18点で表層水(0.5m深)を採取した。

1978年8月28~29日、79年5月9~10日、79年12月13~14日、81年2月3~5日の4回の調査は西南海区水産研究所しらふじ丸に乗船して図8に示す海域で実施した。沿岸が海苔養殖に利用されているため観測毎に採水点が多少かわるが、測点の内の16~20カ所において採水した。81年2月には同時にエックマンバージ型採泥器で採泥した。

沿岸部は、1980年8月5~8日に調査したが、漁船により主として10m以浅に主眼を置いて図9に示すように観測点は北の三崎半島から、愛媛県土居町にかけて40の観測線を引き、各観測線に沿って水深10mまで、または沖合2Kmまでの間に2~4の観測点を設けた。観測線の15, 21, 29, については沖合部まで観測点を延長した。採水は54測点において表層水及び底層水を、水深15m以上の所では中層水を加えて計126検体を採取した。堆積物は全測点で114検体をエックマンバージ型採泥器で採取した。

綾灘東部沿岸は全体的に干潟が発達しており遠浅海岸で、離岸するにしたがい徐々に深くなり、沖合約1Kmで水深10m前後となる。その後もゆるやかに深度を増し、沖合約4Kmで水深20mに達する。しかしながら、現在干潟が残されているのは、香川県沿岸に限られ、その面積は約220haとなっている。

なお、この海域は干満差が大きく、大潮時には4mに達するので干潟がより強調されている。計6回の調査内容は表4に示した。

2.2.2.2 水質分析方法

全懸濁物量(SS): 試水1lを、予め450℃で強熱し重量を測定してあるワットマングラスファイバーフィルターGF/Cで濾過後、再度乾燥して重量増を求めた。

DO: ウィンクラー法のジアゾ変法による。

クロロフィルa: 試水1lをワットマングラスファイバーフィルターGF/Cで濾過後、フィルターを90%アセトン10mlで抽出し、分光光度法により測定した(Lorenzen, 1967; Moss, 1967)。

COD: アルカリ性過マンガン酸カリウム酸化法による(松江, 1961)。

塩分(S): 鶴見精機社製デジタルサリノメーター2-2010型、及び同社製E-202型により測定した。

ケイ酸: メトール及びシユウ酸を還元剤として用いたモリブデンブルー法による(Strickland and Parsons, 1968)。

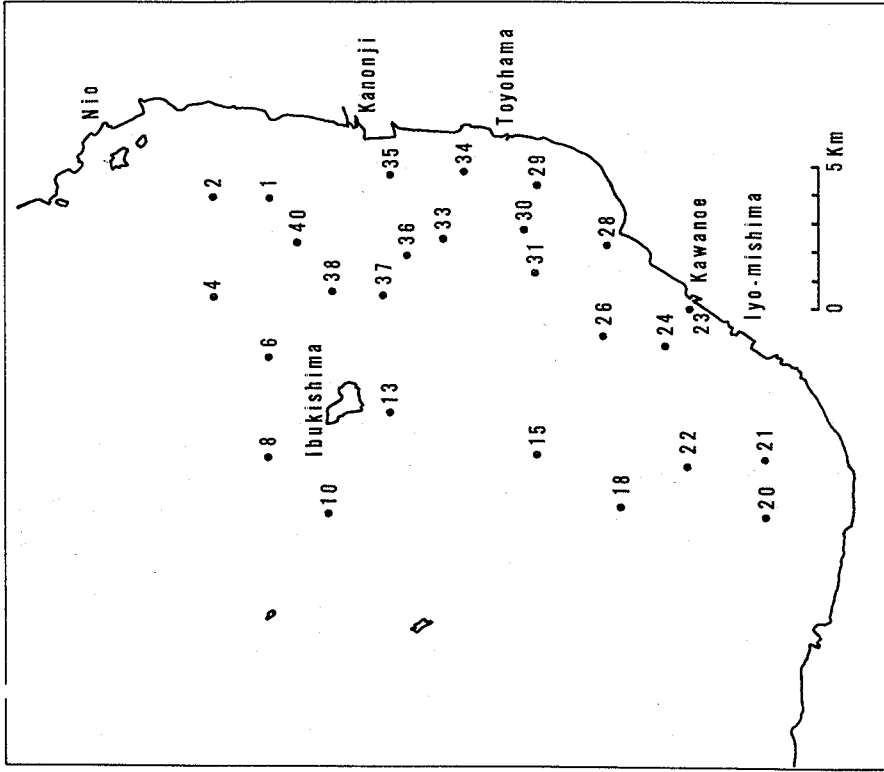


Fig. 8 Location of sampling stations in August 1978, May 1979, December 1979, and February 1981.

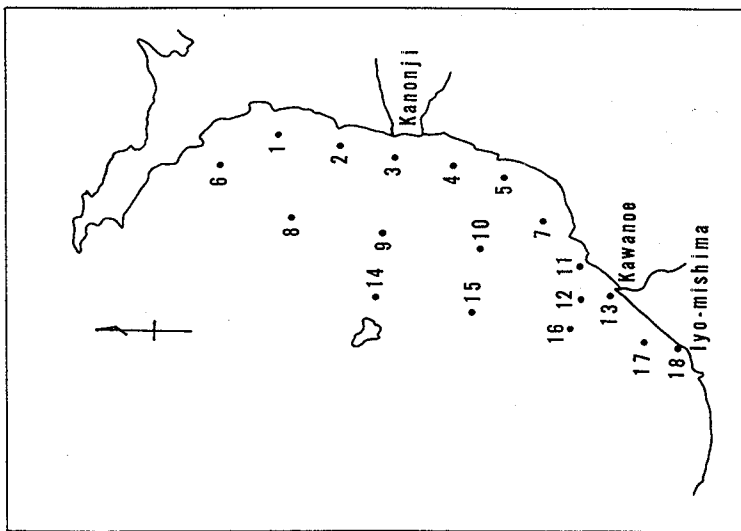


Fig. 7 Location of sampling stations on October 22, 1970.

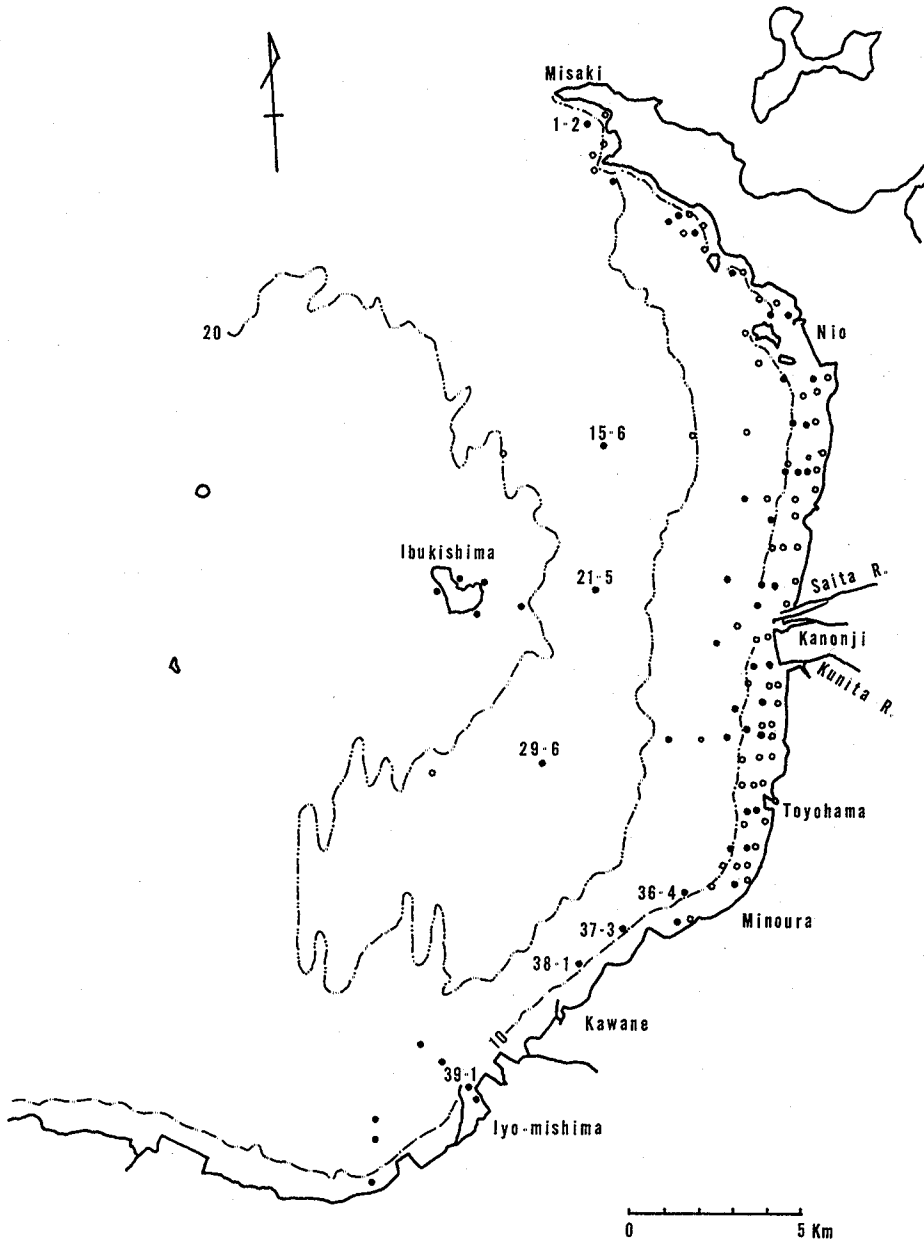


Fig 9 Location of sampling stations in August 1980.
• Collection sites of water and sediment samples
◦ Collection sites of sediment samples

Table 4 Analytical items of sea water and sediments collected between October 1970 and February 1981

Date	Water analysis													UV	Carbo			
	S	DO	SS	POC	PON	DOC	Chl a	Pheo	IP	PP	TP	NH ₄	NO ₂			NO ₃	SiO ₂	
Oct. 22, 1970						0											0	0
Aug 28-29, 1978			0	0	0		0											
May 9-10, 1979	0		0	0	0	0	0	0			0	0	0	0				
Dec 13-14, 1979	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
Aug. 5- 8, 1980	0	0		0	0	0	0											
Feb 3- 5, 1981				0	0	0	0	0	0	0	0							

Date	Sediment analysis									
	COD	Org C	Org N	TP	Pheo	pH	Eh	NH ₄	TS	TFe
Aug 5- 8, 1980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb. 3- 5, 1981	0	0	0	0	0					

S: Salinity SS: Suspended solid IP: Inorganic phosphorus UV: Ultraviolet absorption Carbo: Carbohydrate
 COD: Chemical oxygen demand Eh: Redox potential TS: Total sulfide TFe: Total iron
 Refer to Table 1 for other abbreviations

炭水化物：アンスロン法により測定した。

紫外外部吸収：10 mm 石英セルを用いて275 nm における吸光度を測定した。

その他の分析項目は2. 1. 2. 2で述べた方法によった。

2. 2. 2. 3 底質分析方法

pH 及び酸化還元電位 (Eh) : 東亜電波社製 pH 計 HM-20B で pH を, 堀場製作所製 pH 計 F-5 で Eh を測定した。測定は電極を泥中に約 5 cm 差し込み, pH は 5 分後, Eh は 10 分後に読み取った。なお, Eh は pH 7.5 における Eh 7.5 に補正して表示した。

全硫化物 (TS) : 凍結泥を解凍後, 硫酸酸性下で水蒸気蒸留し, 留分を 10% 酢酸亜鉛溶液に吸収させ, ヨウ素滴定法で測定した。

全鉄: 全リンを測定した時の硝酸・過塩素酸による分解液の一部について o-フェナントロリン法 (日本規格協会, 1981) により比色定量した。

間隙水中のアンモニア: 新鮮な湿泥を遠心分離して得た間隙水 25 ml に, 緩衝液 5 ml を加え, 米国オリオン社製 pH メーター-701A に接続した同社製アンモニウムイオン電極で測定した。緩衝液は水酸化ナトリウム 2.6 g, EDTA · 2 Na · 2 H₂O 12.0 g を 0.1 M リン酸二ナトリウム溶液に溶かし 100 ml とする。これを 6 N 水酸化ナトリウム溶液で pH 12 以上とした。

粒度組成: 風乾泥について, JIS A1204T-1979 (比重計法) により測定した。土性の分類は日本統一分類法 JSF 規格 M-73 によった。

その他の項目の分析は 2. 1. 2. 3 に記載の方法によった。

2. 2. 3 結 果

2. 2. 3. 1 水質環境

1970年10月の調査で, DOC は図10に示すように, 伊予三島, 川之江両市の地先海域で 2 mg/l を超える高い値がえられた。伊予三島港内の測点18では 6 mg/l が観測されたが, 同じ港内で採取された赤褐色の海水では 150

mg/l を超えた。パルプ排水独特の褐色の排水は豊浜町沖でもしばしば観測されていることから、その時の着色海域の DOC は 5 mg/l を超えていたと考えられる。この他に DOC が 2 mg/l を超えたのは観音寺沖の測点 3 と仁尾町沖の測点 1 であった。

パルプ排水中には多量のリグニンが含まれており、それは図11に示すように275 nm の紫外部に吸収極大を有している。精製リグノスルホン酸を紫外部吸収の低い海水に溶解すると、測点17及び18の紫外部吸収曲線と比較的良く一致した。更に濾過海水の275 nm における吸収は図12に示すように DOC の分布と良い一致がみられた。これらの海水の高い紫外部吸収はリグニンやその誘導体に由来するものと考えられる。一般に天然海水にも275 nm 付近に弱いショルダーを有する紫外部吸収が認められており、それはいわゆる水生腐植によると考えられている(小倉, 1967)。しかし、その吸光度は0.05 (光路長10 mm) 以下で微弱である。赤潮海水中には DOC が相当高く検出されるが、一般に植物プランクトンが体外分泌する有機物には275 nm 付近の吸収はみられない。

津軽海峡西部の日本海で採取された海水の275 nm における吸光度は0.015で、これを一応パルプ排水の影響のない海水として、それぞれの海水の紫外部吸収からこの値を差し引いて、測点16, 17及び18の海水中のリグノスルホン酸量を求めると、それぞれ2.8, 8.3及び7.2 mg/l に相当し、上述の赤褐色海水には255 mg/l のリグノスルホン酸が含まれていたことになる。

溶存炭水化物の分布はかなり南方沿岸に限られ、伊予三島港内ではグルコース換算で28 mg/l が検出されたが、伊予三島港の北方 2 Km の測点17では0.6 mg/l にすぎず、DOC や275 nm の吸光度の変化に比べて減少が著

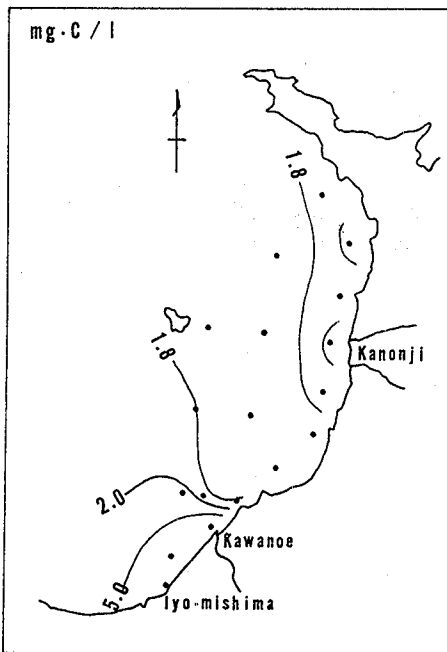


Fig 10 Distribution of dissolved organic carbon in October 1970.

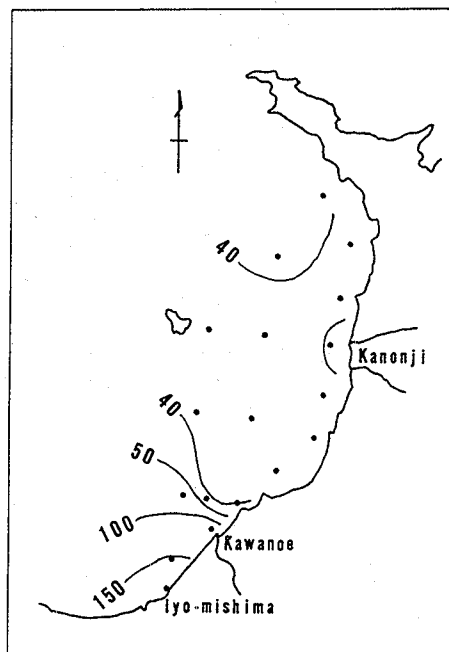


Fig. 12 Ultraviolet absorption of sea water. Absorbance ($\times 10^3$) at 275nm, light pass 10mm

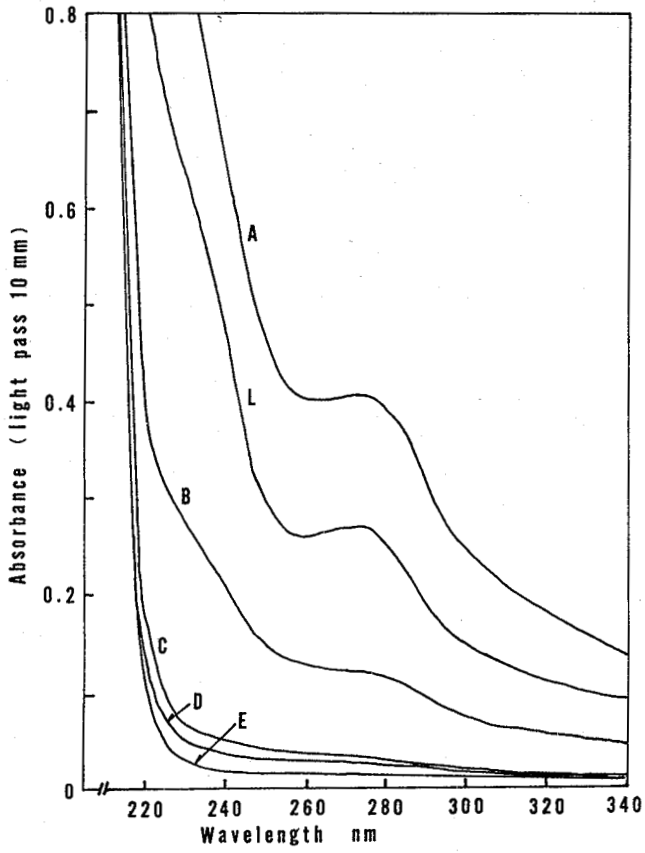


Fig. 11 Ultraviolet absorption spectra of sea water and liginosulfonic acid.
 A : Heavily polluted sea water obtained at the Iyo-mishima Harbor (Stn.18) B : Stn.17 C : Stn.16 D : Stn.3 E : Sea water from the Japan Sea L : Liginosulfonic acid 15mg/l in sea water

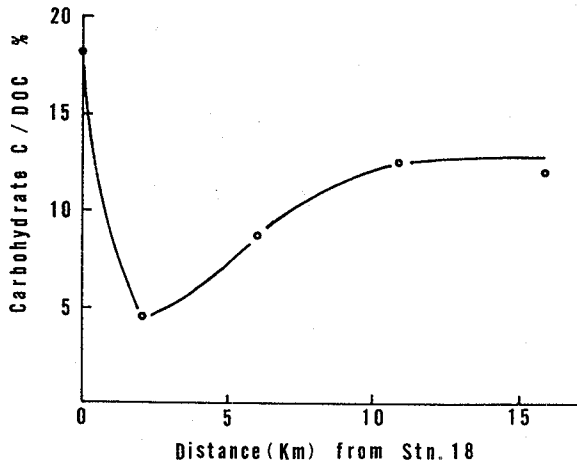


Fig. 13 Carbohydrate contents in dissolved organic substance.

しい。炭素量に換算すると図13に示すように、伊予三島港内の海水中の溶存有機物の約18%が炭水化物となるが、測点17では4.4%にすぎず、他の有機成分に比べて速やかに分解されることがわかる。ただ直接的な汚染域以外の海域では約12%程度となっていた（岡市ら, 1971）。

沖合部の水質環境

懸濁態有機物の指標である POC は一般に高水温時に高いが1978年以降の今回の4回の調査では季節変化はそれほど大きくはなく、表5に示すように0.4 mg/l 前後で比較的安定した値が得られた。それに比べて溶存有機物の指標である DOC は変化が大きく、冬期は1.2 mg/l 前後であったが5月には2 mg/l を超えた。クロロフィル *a* の変化も大きいですが、POC や DOC の変化とは様子が異なり、高水温時に常時高いとは限らず、2月に1.77 $\mu\text{g/l}$ とやや高く、12月に1.15 $\mu\text{g/g}$ と低い結果となった。フェオ色素は5月に0.48 $\mu\text{g/g}$ で相対的にやや高い値を示した。8月と5月に底層でクロロフィル *a*、SS、POC、PON が比較的高濃度に検出された。伊予三島、川之江両市に近い測点24、26でもこれらの値はやや高いが、それ以上に沖合部の測点1、8、10で高い値が得られた。特に1979年5月に測点10の底層でクロロフィル *a* は17.8 $\mu\text{g/g}$ を記録した。

栄養塩については表6に示した。調査の時期は限られたが、窒素について5月と12月の値を比較すると、5月にはアンモニア態窒素がそのほとんどを占めているが、12月には硝酸態窒素が最も多く、これに亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素が続いている。一方、無機態リンは5月には表、中層で枯渇状態にあるが底層で高くなっており、測点8の底層では0.46 $\mu\text{M/l}$ が検出された。12月には無機態リンが最も多く、上下の差もなくなっている。懸濁態リンは5月が最も多く、平均0.59 $\mu\text{M/l}$ で無機態リンと同様に底層で高い傾向がみられた。全リンは無機リンと同様の傾向を示した。

Table 5 Average values of analytical results of sea water collected between August 1978 and February 1981

Date	Layer	WT °C	S	SS mg/l	POC μg/l	PON μg/l	DOC mg/l	Chl a μg/l	Pheo μg/l
Aug 28-29, 1978 (17 stations)	U			1.35 (0.51)	395 (93)	53 (15)		0.61 (0.32)	
	M			1.45 (0.58)	438 (116)	59 (20)		1.53 (0.74)	
	B			2.66 (0.13)	458 (164)	67 (23)		2.80 (0.84)	
	Mean			1.71 (0.97)	430 (130)	60 (21)		1.62 (1.11)	
May 9-10, 1979 (20 stations)	U	16.5 (0.7)	32.48 (0.43)	4.54 (1.43)	425 (252)	45 (37)	2.11 (0.30)	0.80 (0.57)	0.49 (0.46)
	M	14.9 (0.6)	32.61 (0.11)	3.88 (0.77)	396 (105)	39 (9)	2.08 (0.29)	0.73 (0.41)	0.56 (0.54)
	B	14.0 (0.5)	32.59 (0.40)	6.51 (1.78)	606 (228)	59 (19)	2.24 (0.37)	3.33 (3.91)	0.38 (0.21)
	Mean	15.1 (1.2)	32.56 (1.78)	4.98 (1.78)	476 (226)	48 (26)	2.14 (0.33)	1.62 (2.59)	0.48 (0.43)
Dec 13-14, 1979 (19 stations)	U		31.73 (0.11)		370 (75)	48 (10)	1.75 (0.78)	0.80 (0.26)	0.40 (0.32)
	M		31.75 (0.12)		439 (114)	60 (16)	1.96 (0.52)	1.35 (0.54)	0.29 (0.20)
	B		31.80 (0.14)		381 (77)	48 (10)	1.77 (0.79)	1.27 (0.63)	0.35 (0.26)
	Mean		31.76 (0.13)		396 (95)	52 (13)	1.82 (0.72)	1.15 (0.56)	0.35 (0.27)
Feb. 3-5, 1981 (20 stations)	U	6.2 (0.9)			411 (85)	53 (28)	1.30 (0.14)	1.71 (0.48)	0.37 (0.19)
	M	7.5 (0.4)			335 (58)	45 (8)	1.24 (0.19)	1.72 (0.43)	0.36 (0.19)
	B	7.7 (0.3)			383 (165)	52 (19)	1.21 (0.13)	1.88 (0.49)	0.38 (0.24)
	Mean	7.1 (0.9)			377 (117)	50 (20)	1.25 (0.16)	1.77 (0.47)	0.37 (0.21)

Refer to Table 2 for U, M and B.

Table 6 Average values of analytical results of nutrients in sea water collected between May 1979 and February 1981.

Date	Layer	NH ₄ μ M/l	NO ₂ μ M/l	NO ₃ μ M/l	IP μ M/l	PP μ M/l	TP μ M/l	SiO ₂ μ M/l
May 9-10, 1979 (n=20)	U	1.77 (0.25)	0.03 (0.02)	0.06 (0.09)	0.08 (0.08)		0.46 (0.14)	3.2 (2.6)
	M	1.96 (0.35)	0.01 (0.02)	0.05 (0.08)	0.07 (0.06)		0.48 (0.08)	2.2 (1.6)
	B	2.17 (0.46)	0.02 (0.03)	0.08 (0.16)	0.18 (0.11)		0.84 (0.27)	4.1 (1.8)
	Mean	1.96 (0.40)	0.02 (0.02)	0.06 (0.11)	0.11 (0.10)		0.59 (0.25)	3.2 (2.2)
Dec 13-14, 1979 (n=19)	U	1.15 (1.18)	1.22 (0.13)	2.78 (0.80)	0.44 (0.04)	0.20 (0.06)	0.89 (0.19)	10.5 (1.9)
	M	0.88 (0.45)	1.22 (0.15)	2.63 (0.57)	0.45 (0.05)	0.26 (0.07)	0.94 (0.13)	10.2 (1.9)
	B	0.82 (0.47)	1.17 (0.14)	2.47 (0.65)	0.45 (0.13)	0.23 (0.09)	0.94 (0.17)	11.8 (5.1)
	Mean	0.95 (0.80)	1.20 (0.15)	2.63 (0.70)	0.44 (0.09)	0.23 (0.08)	0.92 (0.17)	10.9 (3.43)
Feb. 3-5, 1981 (n=20)	U				0.19 (0.06)	0.17 (0.05)	0.60 (0.10)	
	M				0.19 (0.05)	0.17 (0.04)	0.56 (0.07)	
	B				0.20 (0.06)	0.20 (0.08)	0.66 (0.21)	
	Mean				0.19 (0.06)	0.18 (0.06)	0.61 (0.15)	

Refer to Table 2 for U, M and B

沿岸部の水質環境

1980年8月に調査した観測点の内、陸から2 km 以上離れた観測点及び伊吹島周辺の観測点を除いた44測点の観測結果を集計したのが表7である。

底層水の採取水深は底泥上1 mとしたが、その平均採水深度は11.5mであった。

水温は8月上旬としては例年になく低水温で、表層水温は23.3℃、底層水温は22.1℃であった。

塩分は表層で30.48%、底層で31.51%となり、上下の差が1%以上も観測された。陸により近い測点の表層では約25%近くまで塩分が低下しており、降雨の影響によると見られる。DOは表層で6.63 mg/l、底層で5.44 mg/l が検出された。陸に近くても水深の深いところでは DO の低下が大きく、測点1-2（水深22m）では4.27 mg/l を記録している。

POC は表層でやや少なく0.38 mg/l、底層で0.44 mg/l と多い結果となった。POC が多く検出されたのはクロロフィルa の最も多かった伊予三島港口に近い測点39-1で1.12 mg/l であった。また庄内半島先端に近い測点1-2でも表層で1.10、底層で1.66 mg/l が検出された。

DOC は上下の差が小さく、平均1.7 mg/l 程度で、クロロフィルa の多いところでやや高い傾向が見られた。伊予三島港から約1.4 km 沖合の測点39-2では最高値である4.54 mg/l を記録した。

クロロフィルa は表層で2.15 μg/g、底層で1.31 μg/g とその差が大きく開いた。先述の POC とは逆であった。クロロフィルa が最も多く検出されたのは伊予三島港口に近い測点39-1で、11 μg/g を記録した。また、観音寺市を流れる財田川河口近辺で4~5 μg/g、箕浦沿岸で5~7 μg/g が観測された。

Table 7 Average values of analytical data of sea waters from shallow water area of Eastern Hiuchi Nada in August 5-8, 1980.

Layer	Depth m	WT °C	pH	S ‰	DO mg/l	TP M/l	Chl a μg/l	POC μg/l	PON μg/l	DOC mg/l
Upper (n=38)	0.5	23.2 (1.1)	7.98 (0.06)	30.482 (1.494)	6.43 (1.62)	0.65 (0.37)	2.09 (2.03)	381 (236)	44 (29)	1.63 (0.55)
Bottom (n=44)	11.5 (4.1)	22.1 (0.5)	7.90 (0.05)	31.512 (0.121)	5.42 (0.61)	0.64 (0.12)	1.28 (0.62)	450 (241)	48 (27)	1.62 (0.29)
Mean (n=82)		22.7 (1.0)	7.94 (0.07)	31.064 (1.118)	5.81 (1.26)	0.65 (0.27)	1.69 (1.57)	416 (241)	46 (28)	1.67 (0.44)

Table 8 Chemical characteristics of sea water obtained from deeper region of Eastern Hiuchi Nada, in August 5-8, 1980.

Station No	Depth m	WT °C	pH	S ‰	DO mg/l	TP μM/l	Chl a μg/l	POC μg/l	PON μg/l	DOC mg/l	
15-6	0.5	25.2	8.13	30.48	7.31	0.40	1.98	300	32	1.47	
	2.5	23.7			7.20						
	5.0	23.0	8.03	29.43	6.74	0.58	1.95	290	41	1.35	
	7.5	22.8			6.66						
	10.0	22.4	7.96	31.45	6.10	0.62	2.73	300	52	1.21	
	12.5	22.3			5.31						
	15.0	21.9	7.97	31.54	4.93	0.81	2.78	220	44	1.80	
	17.5	21.4	7.91	31.65	4.10	0.94	1.46	190	21	1.35	
	20.0	21.4	7.90	31.67	4.03	1.08	1.30	310	35	1.32	
	22.5	21.3	7.90	31.72	4.04	1.18	1.39	270	39	1.18	
	24.0	21.3	7.88	31.74		1.24	1.76	290	27	1.46	
	21-5	0.5	24.9	8.11	30.40	8.03	0.53	2.81	620	66	1.58
		2.5	24.7			7.76					
		5.0	23.4	8.06	31.20	6.90	0.52	1.39	280	29	1.40
7.5		22.6			6.06						
10.0		22.4	7.99	31.54	5.44	0.75	3.48	260	33	1.48	
12.5		22.2			5.00						
15.0		21.8	7.96	31.65	4.80	0.84	1.55	200	20	1.40	
17.5		21.7	7.94	31.67	4.72	0.80	1.16	170	13	1.40	
20.0		21.6	7.93	31.69	4.61	0.84	1.07	220	33	1.28	
23.0		21.5	7.94	31.67	4.79	1.00	1.07	270	38	1.40	
29-6		0.5	24.5	8.17	29.70	9.69	0.64	4.83	61	16	1.43
		2.5	24.0			8.77					
		5.0	23.2	8.09	31.24	7.44	0.48	2.28	430	44	1.85
		7.5	22.9			7.11					
	10.0	22.4	7.96	31.45	6.04	0.78	3.29	300	40	1.32	
	12.5	22.1			5.40						
	15.0	22.0	7.99	31.54	5.31	0.79	1.75	220	31	1.23	
	17.5	21.8	7.95	31.63	4.71	0.81	1.82	220	23	1.13	
	20.0	21.8	7.94	31.65	4.64	0.99	1.35	300	37	2.01	
	22.5	21.7	7.91	31.67	4.39	1.15	1.68	310	38	2.00	

全リンは上下の差がほとんどなく0.64 $\mu\text{g/g}$ 程度であった。ただ、観音寺市を流れる柞田川の河口で、2.43 $\mu\text{M/l}$ が検出され、また箕浦の沿岸でも1.52 $\mu\text{M/l}$ が検出された。

沿岸部の観測時にあわせて沖合の水深23m以上の測点15-6, 21-5, 29-6において2.5m間隔で採水、分析した結果を表8に示した。水温は表層から深くなるに従い低下し、測点15-6では17.5m以深ではほぼ一定となる。測点21-5及び29-6では15m以深でほとんど変化がなくなる。上下の温度差は測点15-6, 21-5, 29-6はそれぞれ3.9, 3.4, 2.8 $^{\circ}\text{C}$ となった。

塩分は表層で低く、底層で高い濃度勾配がみられた。上下で1%以上の差が認められるが、その変化は概して10m以浅であり、それ以深の変化は少ない。

pHは表層で8.1以上であるが底層では7.9前後に低下した。

DOは表層の変化が大きいが、測点21-5では15m以深ではほぼ一定値となり、測点15-6及び29-6では17.5m以深で一定となっており、いずれの測点においても底層で貧酸素化しており、特に測点15-6で4.0 mg/l にまで低下していた。

POCは表層でのバラツキが大きいが、17.5m深までは徐々に低下し、以後増加する傾向がみられた。PONは中層でやや高く、17.5mで最小値を示した後、底層で再び増大した。DOCはバラつきが大きく、一定の傾向は認められなかった。

クロロフィルaは表層から5m深まで低下し、10m深で再び増加後減少した。

全リンは表層で少なく約0.5 $\mu\text{M/l}$ 程度であるが、底層に向かって直線的に増加し、底層では1 $\mu\text{M/l}$ を超えた。

2. 2. 3. 2 底質環境

1981年2月に採取した底泥20点の分析結果を表9に示した。

CODが最も高いのは伊予三島港沖合約2.5kmの測点24で31.7 mg/g であり、他には30 mg/g を超える測点はなかった。CODが25 mg/g を超えたのは図14に示すように伊予三島、川之江両市から巾5kmまたはそれ以上で北方に延びており、香川県沿岸の水深15m以浅の海域は15 mg/g 以下である。

有機炭素量もCODとほぼ同様の傾向にあり、最高は23.1 mg/g であった。そのほかの有機窒素、全リン、炭水化物、フェオ色素等もCODと概略分布は同じであったが、細部で多少の違いがみられた。すなわち、有機窒素の最高値2.72 mg/g は測点4であり、フェオ色素の最高値88.5 $\mu\text{g/g}$ は測点6、炭水化物炭素の最高値1.32 mg/g は測点8で得られた。

1980年8月の調査の内、最も代表的な有機炭素の分布を図15に示した。概して水深10m以浅では有機炭素は10 mg/g 以下であり、20m以浅では15 mg/g 以下であった。ただ、伊予三島、川之江両市の沿岸部では10m以浅であっても15 mg/g を超え、最高38.1 mg/g を記録した。また、伊吹島周辺においても20 mg/g を超える場所があった。そして20m以深の海域においてはいずれの測点も15~20 mg/g を示した。

10m以浅の沿岸部での有機炭素の平均を求めると9.0 mg/g となり、同様に有機窒素の平均値は0.93 mg/g で、C/N比の平均は9.5となった。有機炭素と窒素の間には高い相関関係が認められるものの、測点36-4, 37-3, 38-1, 39-1のC/N比は17~25の範囲にあり、他の測点に比べて高い値が得られた。同様に有機炭素とフェオ色素、全リン、全鉄の間にも高い相関が得られるが、測点38-1, 39-1は大きく外れていた。全リンについては伊吹島周辺で相対的に高い傾向にあった。全硫化物と有機炭素の関係をみると、測点38-1, 39-1では相対的

Table 9 Characteristics of surface sediments from Eastern Hiuchi Nada in Feb. 3-5, 1981.

Stn.	COD mg/g	Org C mg/g	Org N mg/g	C/N	TP mg/g	Pheo* μg/g	Carbo** C·mg/g
4	28.5	21.2	2.72	7.8	0.611	70.1	1.21
6	24.4	19.3	2.39	8.1	0.676	88.5	1.28
8	27.5	20.0	2.56	7.8	0.648	77.7	1.32
10	19.5	17.3	2.24	7.7	0.654	64.3	1.12
13	25.8	19.4	2.39	8.1	0.592	75.3	1.22
15	25.7	18.2	2.26	8.1	0.580	62.7	0.85
18	24.1	18.2	2.29	7.9	0.639	64.1	1.13
20	20.1	17.4	2.04	8.5	0.567	45.7	0.88
22	23.7	18.8	2.26	8.3	0.552	52.4	1.00
24	31.7	23.1	2.27	10.2	0.589	66.1	1.26
26	29.2	21.1	2.41	8.8	0.753	70.9	1.14
28	0.7	1.0	0.17	6.1	0.186	3.2	0.06
29	14.3	10.5	0.82	12.8	0.381	25.5	0.52
30	20.2	17.3	1.78	9.7	0.493	43.0	0.88
31	27.8	20.5	2.37	8.6	0.601	68.3	1.04
33	10.6	7.3	0.82	8.9	0.285	25.9	0.42
36	17.6	12.7	1.44	8.8	0.428	47.9	0.70
37	20.4	19.1	2.32	8.2	0.552	42.8	1.06
38	24.7	20.1	2.50	8.0	0.648	72.7	1.09
40	22.6	19.2	2.36	8.1	0.512	70.8	1.14
Average	22.0	17.1	2.02	8.5	0.547	56.9	0.97

Pheo*: Pheopigments Carbo***: Carbohydrate

に硫化物が少なく、逆に仁尾港外、観音寺市内を流れる財田川及び柞田川の河口部、伊吹島近辺で高い値が得られた。底泥表層の pH は平均 7.36 で海水に比べて低い値を示し、底質が砂のところでは海水の pH に近くなる。しかし、有機炭素が 5 mg/g 以上のところでは pH 7~7.6 の間で変動し、特定の傾向は認められなかった。

Eh_s は大部分の測点で -50~-450 mV の範囲にあり、有機炭素との間には明確な相関は認められなかった。

東部海域の底泥の粒度組成は海岸部の均質な砂から沖合部のシルト及び粘土へと規則的な変化がみられた。沿岸の干潟については観音寺市以南は和泉砂岩を母岩とする粒径 0.105~0.25 mm の区分が 85% を占めており、同以北は花こう岩を母岩とする粒径 0.25~0.45 mm のものが 70% を占める均質な砂で形成されていた。底泥中の微細泥率、すなわち粒径 0.04 mm 以下の粒子が占める割合についてみると、水深 10m 以浅では 40% 以下で、粒径 40~100 μm のシルトが比較的多く、シルト質壤土ないしシルト質堆積土であった。10m 以深では粒径 5~40 μm の粘土及びシルトが 60% 以上を占めるシルト質堆積土であった。北方の三崎に近い海岸部だけは沖に向かって急に深くなる海底地形をしており、陸岸に近い地点でも微細泥率が高い（川田，越智，1987）。

なお、底生生物の調査を九州大学菊池と共同で実施し、またアマモの移植実験を香川県水産試験場と行ったが、これらの結果については次節で水質、底質環境との関連で考察するにとどめてある。

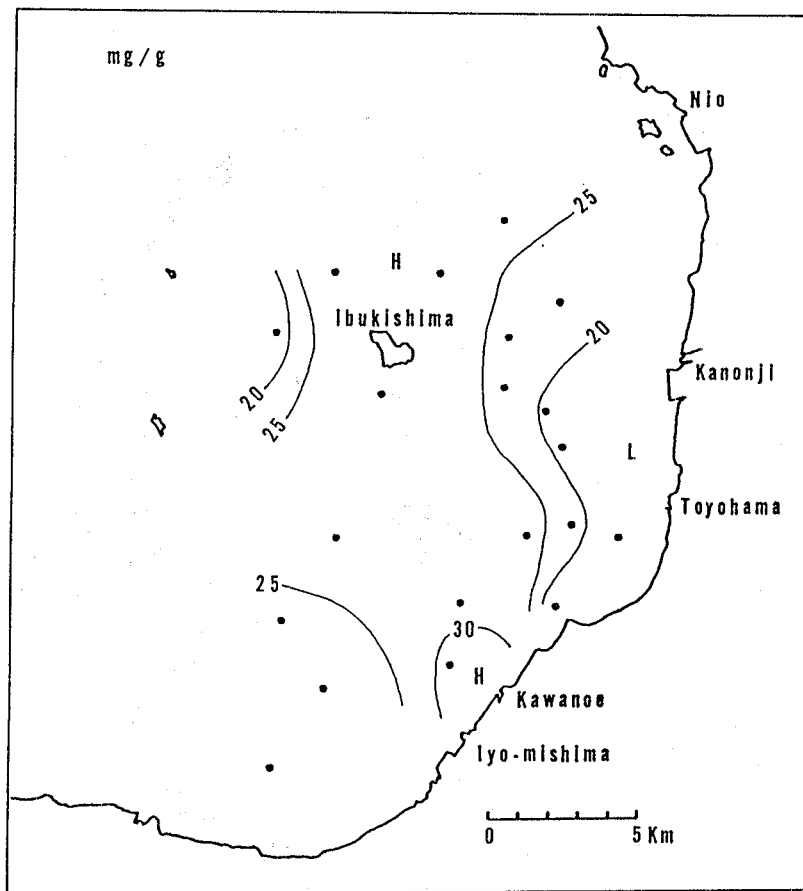


Fig. 14 Distribution of COD in surface sediments of Eastern Hiuchi Nada in February 1981.

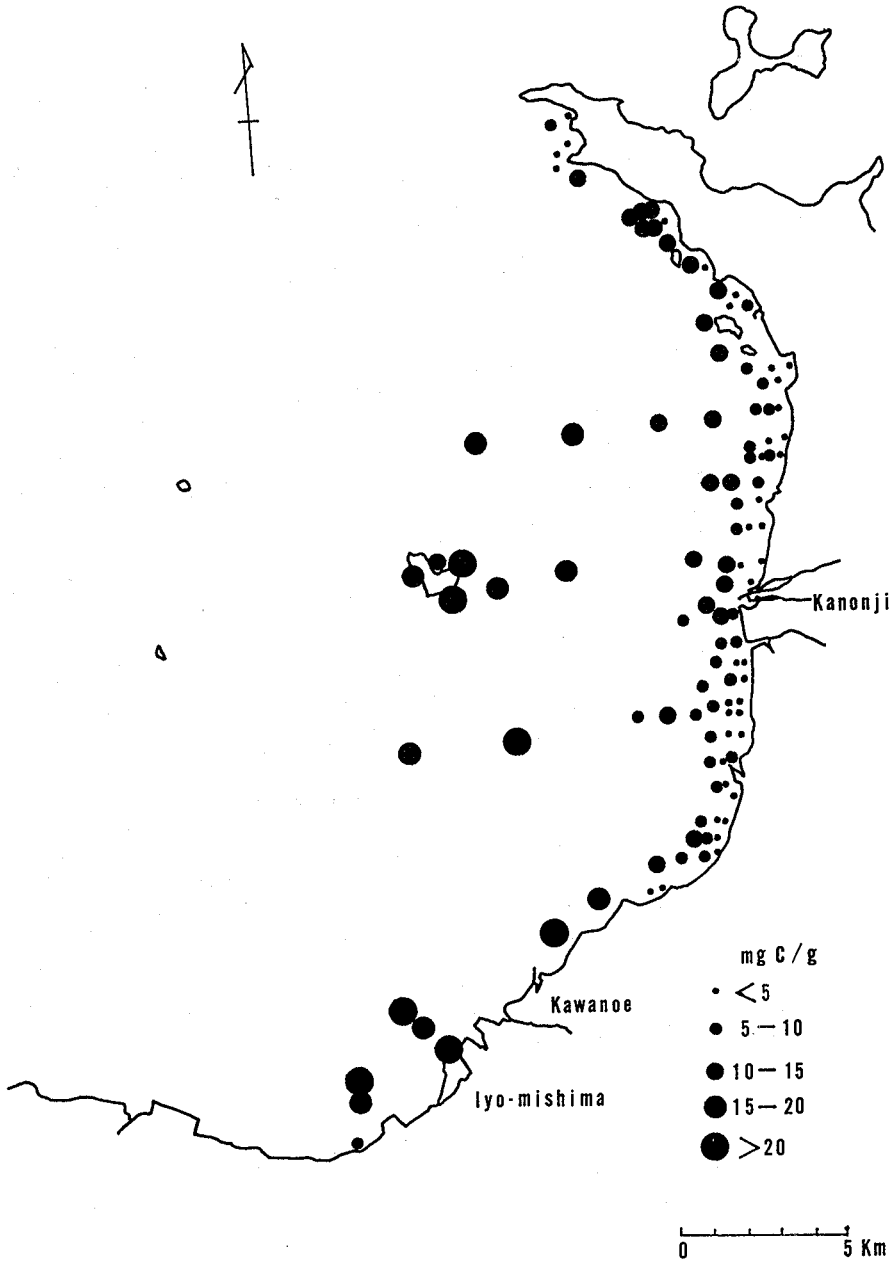


Fig 15 Distribution of organic carbon in surface sediments of Eastern Hiuchi Nada in August 1980.

2. 2. 4 考 察

2. 2. 4. 1 化学環境

1970年代には伊予三島港及びそこから半径数 Km 以内はパルプ排水独特の赤褐色を呈していた。潮汐や風向きによっては香川県の沿岸域にも排水が漂着していたことが目撃されている。着色域の海水中には高濃度の DOC や炭水化物が検出された。また海水の紫外部吸収曲線はリグノスルホン酸のそれとほぼ一致し、275 nm に吸収極大が認められた。

当時の製紙排水の直接的な影響は、リグノスルホン酸の分布、溶存炭水化物の分析結果から工場の排水口付近から北方10 Km に達していた。

1978年になると燧灘東部海域の POC やクロロフィル *a* の濃度は全体的にやや高く推移しているが、1970年当時比べて夏期のクロロフィル *a* 濃度は明らかに低下していた。ただ問題は成層期に底層水中にクロロフィル *a* や POC が高濃度に検出されたことである。1978年以降では成層期の透明度が8~12mに達し、非常に清澄に見えるが、透明度深より深い底層水中では DO 濃度が低下し、栄養塩類と懸濁態有機物に富んでおり、生物の生息環境として不適當であることが推察される。

しかしながら、東京湾、伊勢湾、大阪湾等（環境庁水質保全局、(社)瀬戸内海環境保全協会、1985）と比較してみると、全窒素で1/2~1/7、全リンで1/3程度と少なく、クロロフィル *a* についても2/3~1/5と少なく、決して数字の上では大きくない。それにもかかわらず、貧酸素水塊が形成されるのは、他の海域に比してより閉鎖的であり、安定な成層が形成されるためと考えられる。従って、海域の環境評価は栄養塩濃度やクロロフィル *a* 濃度だけでは不十分で、潮流のような物理条件及び底生生物に代表されるような生物指標も重要であることがうかがい知れる。

南部の製紙工業地帯から排出されていた COD が高く有機懸濁物の多い排水が規制されたのち、1978年には沿岸の POC は低下していた。しかし、DOC は高濃度に検出されることがあることから、排水処理により浮遊固形物は除去されているが、溶存有機物の除去が充分でないものと思われる。

一方、海底堆積物の COD が30 mg/g を超えるのは南東部の伊予三島、川之江両市に近い沿岸に限られており、中北部では認められなかった。しかしながら水深20m以深の海域では COD が25 mg/g を超えており、底質

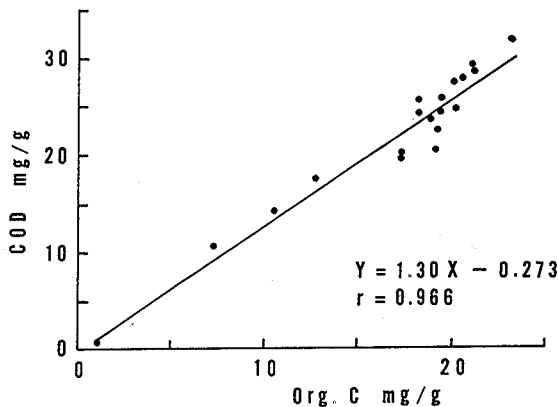


Fig. 16 Relation between COD and the concentration of organic carbon in sediments.

の回復に長時間を要するようになると思われる。COD の分布と有機炭素の分布がほぼ一致することから両者の回帰直線を求めると図16のようになり、両者の間には

$$\text{COD} = 1.30 (\text{Org C}) - 0.27 \quad (n = 20, r = 0.966)$$

の関係が認められた。

また、同様に有機炭素とフェオ色素の間にも高い相関関係が示された。ただ、測点39-1の伊予三島港及びそこから北東方向5 km の測点38-1は有機炭素が著しく多いにもかかわらず、フェオ色素が少ないことや、C/N比が著しく大きいことから考えて、プランクトン起源の有機物だけではなく、製紙排水に由来する窒素を含まないセルロース様物質による有機汚染の直接的な影響下にあると推定された。

フェオ色素に対する有機炭素や窒素の割合についてみると観音寺市内を流れる財田川以北と以南で大きく異なっていることが明らかとなった。すなわち、南部は C/Pheo, N/Pheo がそれぞれ1,000及び100を超えているが、北部ではそれ以下であることから、北部は相対的に植物プランクトン起源の有機物が多いことになる。この状況は先に述べた製紙廃水の影響域とよく一致していると思われる。

本海域では20m以深の所の有機炭素やフェオ色素が多いが、15m以浅では少ないことが明らかであるので、1980年8月の調査で、海岸から沖合に向かって伸びた3本の観測線15-1~15-7, 21-1~21-6, 29-1~29-7の20測点について、水深と有機炭素の関係をみると図17に示したように

$$\text{Org C} = 0.892 (D) - 2.00 \quad (n = 20, r = 0.963)$$

の一次回帰式が得られた。

また、同様にフェオ色素との間には

$$\text{Pheopig.} = e^{0.142D + 0.374} \quad (n = 20, r = 0.949)$$

に示す回帰式が得られた。

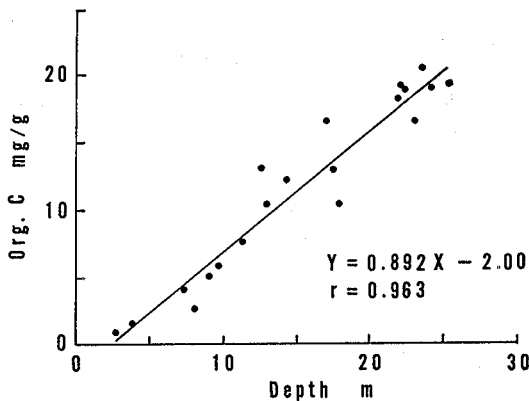


Fig. 17 Relation between the concentration of organic carbon in sediments and the depth of water

従ってこの海域では水深によって質量の小さい浮遊固形物の堆積量が支配されていることになる。

一般に沈降粒子束は浅海域においては水深が大きい場所で大きいと考えられるが、それだけではなく沈降粒子が堆積物上を水平方向に移動することも考えなければならない。浅いところに沈降した物質は波や潮汐流によってより深く、流速の遅い所へ徐々に移動していくものと考えられる。

そこで同時に採取した堆積物の粒度組成を分析した結果、水深と粒径0.04 mm以下の微細泥率の間にも図18に示すような関係が認められた。燧灘東部海域は沖合に向かってなだらかな傾斜があり、起伏はほとんど無く、平坦で単純な海底地形となっている。また、潮流も弱いために、水深が深くなるに従い粒度組成は単純に細かくなっている。水深が深い所になると60%を超えるようになる。

底泥の微細泥率と有機炭素含量との間には高い相関関係が認められ、またフェオフィチン、硫化物、全鉄など、あらゆる成分の濃度も水深との関係で説明できるといっても過言ではない。従って底泥は潮汐流によって絶えず動かされ、海岸近くでは滞砂作用が営まれ、沖合部では滞泥作用が営まれている。その結果、海岸には均質な砂からなる干潟が形成され、沖合の深いところには粘土のような細かな粒子が沈降堆積し、同時にプランクトンの遺骸のような軽い微細な粒子も集積しているものと考えられる。

硫化物は生活排水の流入のある河口部においては水深が浅くても0.3 mg/gを超えることもあるが、それ以外では水深15m以上の海域に限られている。

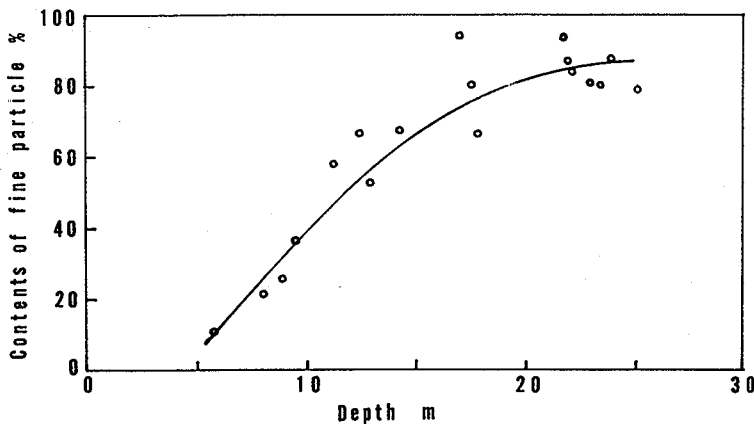


Fig. 18 Relation between the fine particle contents in sediments and the depth of water.

2. 2. 4. 2 環境と生物との関係

燧灘東部海域の水産動物については第5章で述べるように、漁獲高は1965年頃から1979年にかけて約4倍の伸びを示したが、それはカタクチイワシ及びシラスの多獲によるものであった。換言すれば比較的栄養段階の低次のプランクトン食性種の割合が増加し、高次の底生性で肉食性魚類の割合は低下した。クルマエビ及びその他の雑エビ類、ガザミ等の甲殻類の減少も著しい。

燧灘（備後灘を含む）における赤潮の発生は1974年の43回をピークに減少傾向にあるが、これまでに赤潮によってマダイ、スズキ、アナゴ、その他の天然魚の斃死がみられた（環境庁水質保全局、瀬戸内海環境保全協会、1985）。1970年8月には台風10号の来襲後、燧灘東部海域で養殖ハマチ22万尾、天然のボラ、クロダイ、クルマエビなどが数百万尾も斃死した。そして1973年と1976年には海底に蓄積していたヘドロの浚渫、埋立の影響によりトリガイの大量斃死を招いた。

前述の漁業生産高の伸びと質的变化は高価格魚類に対する漁獲圧力だけではなく、富栄養化やそれに伴う赤潮発生、貧酸素水塊の形成に代表される漁場環境の悪化を反映していることは明白である。

底生生物についても菊池、越智（1987）によって調べられており、それによれば本海域では水深10m前後の海域で種類数、個体数が最も豊富であり、5m以浅及び15m以深では減少している。水深10m前後の海域で底生生物が比較的豊富なのは、底質の粒径分布に幅があり、有機物を適当に含有していることや、貧酸素水の影響を直接的に受けることもなく、硫化物が少ないことによるものと考えられる。この海域で最も多いのは多毛類であり、その中では特に *Lumbrineris longifolia*（ギボシイソメ）が多く、次いで小型多毛類の *Prionospio* (M.) *pulchra* と *Cossura coasta* が続いている。これらも堆積物中の微細泥率が約80%以上、硫化物が0.1 mg/g 以上になると極端に減少し、優先種は *Theora lubrica*（シズクガイ）に変わるが、それも若齢個体が多く、成層期以外の季節に他海域から新たに加入したものと考えられる。今林（1983, 1989）や香川（1984）によれば、本種はDOが3 ml/l (4.3 mg/l) 以下では生存が困難と考えられているので、シズクガイの生息密度はこの海域の夏期の底層水のDO濃度によって支配されているものと推察された。

一般に採集される底生生物はいずれも富栄養、有機汚濁に強い種であり、甲殻類や寿命の長い大型種はほとんど出現しなかったが、種類数、密度ともに1968～76年当時（菊池、1978）に比べて、やや増加の傾向が認められた。

これまでに述べてきた水質及び底質調査とあわせて干潟域の環境調査、アマモ場の造成、きょく皮動物の1種ハスノハカシパンの分布調査、及びハマグリ の養殖等について燧灘東部海域の沿岸で香川県水産試験場と共同して実施した（香川県、1987）。その概略を以下に紹介しておく。

燧灘に面する香川県沿岸には220 haにおよぶ干潟が残されている。それらの干潟の砂は細かく均質であることが大きな特徴であり、有機物の蓄積もほとんど無く有機炭素含量はいずれも1 mg/g 以下であった。波打ち際のいわゆる汀水中の栄養塩は少ないが、干潟に流入する河川水や浅層地下水などの陸水中にはケイ素、硝酸態窒素が特異的に高濃度に検出されることがあった。海岸動物は貧弱であったが、その中で相対的に多い動物は潮上帯付近で巻貝のタマキビガイ類、中潮帯ではコメツキガニ、低潮帯では甲殻類のニホンスナモグリであった。生物相が単調であるのは基底が均質で細かい砂でできていること、有機物の蓄積が極端に少ないこと、及び干出時間が長いことによるものと推察される。

ハマグリ の養殖試験は1965年頃まで天然の貝が採れていた干潟で行った。1983年から3地区で3カ年間、毎年5、6月に熊本県有明産の種苗を用いて地蒔、籠養殖を実施し、10、11月頃に収穫した。しかし1984年は8月下旬から9月上旬に大量斃死が起こり、1985年は盗難によりほとんど出荷できなかった。1983年の場合、成績の良い

地区では5月26日に殻長21.3 mm, 重量2.8 gであったものが, 10月4日には34.9 mm, 重量11.1 gとなった。この地区は干潮時に淡水が流入する“みお”があり, 更にクロロフィル a が相対的に多い懸濁粒子を適量含み, 干出時間が短いという傾向にあった。ハマグリ養殖には致死原因の解明, 風波に強い養殖施設の開発, 漁場管理の徹底など多くの問題が残されている。

アマモ自生地は1983年現在で3カ所が小さいながらも確認できたのでそれら自生地の底質を調べた。その結果, 底泥の粒度組成は平均的には砂率90%, シルト10%くらいの壤質砂土で, 砂区分については粒径分布に幅がある場所に分布していた。化学的側面からみると, 有機炭素含量は1~3 mg/g, 全硫化物0.1 mg/g 以下, 全リン0.1~0.3 mg/g が検出される底質の場所に自生していた。

アマモの移植は5, 9, 12月に実施したが, 燧灘ではアマモの衰退期である9月以外は地下茎が分枝する時期で適期であったと思われる。移植容器としてペーパーポット, 金網, ムシロを使用した結果, ガット船で採取したアマモをムシロに括げて再度ガット船で沈設する方法が最も活着率が高かった。播種による方法は5月から7月にかけて花枝を採取し, 熟した種子を5℃で11月まで保存した後, 11月にシーダーテープに容れて海底に固定した。この方法によっても良好な発芽が認められ順調に生育していたが, 7月頃から葉体部に付着硅藻が覆うようになり徐々に衰退し減耗した。将来アマモの群落をつくるためには種子を用いる方法が効果的であると考えられるが, 燧灘は発芽時期(11~1月)に西寄りの季節風によって大量の砂の移動が認められるので, その対策が重要である。

ハスノハカシパンは1978年に燧灘東部沿岸海域で異常発生し, 79年に駆除事業が実施された。ところがその後も依然として広範囲に分布しており, 多いところでは3 Kg/m² に達していた。生息域は水深1.5~7 mの間で, 特に水深2.5~5.5 mの砂質底において高密度であった。今のところその異常発生の要因については不明である。

2. 2. 5 要 約

伊予三島及び川之江両市の沿岸域に高濃度の DOC が検出されるが, それらの海水の紫外部の吸収曲線がリグノスルホン酸のそれに一致すること及び海水の275 nm の吸光度と DOC 濃度がほぼ一致することより DOC は紙・パルプ製造工場排水に由来する有機物であると考えられた。

1978年から1980年にかけて燧灘東部海域の富栄養化及び有機汚染の実態を明らかにする目的で調査を行った結果, 富栄養化については1970年頃に比べて1980年にはクロロフィル a 濃度, 栄養塩濃度から幾分回復の兆しが認められた。紙・パルプ製造工場から排出されている排水中には懸濁態有機物はほとんど含まれていないようであったが, 溶存態有機物は未だかなり排出されていた。

底質については南部の伊予三島, 川之江両市の沿岸部及び水深20m以深の海域で有機炭素濃度が20 mg/g 以上検出された。南部では陸起源有機物の割合が高いことが確認され, それ以外の海域は相対的に海産プランクトン起源の有機物の割合が高いことも明らかにされた。更に水深と堆積物中の有機炭素, 有機窒素, 全リン, 全鉄, フェオ色素濃度及び微細泥率の間には正の相関関係が認められ, 比較的深い燧灘の北東部が諸々の物質の沈降, 堆積域となっていることが推察された。

本海域には高水温時に安定な成層が形成され, 底層水中の DO 濃度の低下が著しく, 水産動物, 底生生物に対する影響が懸念された。水産動物については海域の富栄養化とともに低次の栄養階層にあるカタクテイワシの生産の伸びは著しいものの, 高次の水産動物は減少した。底生生物は種類数, 密度ともに貧弱であるが, その中には汚染に強い種, 寿命が短い種, 若齢個体が相対的に多い傾向がみられた。

1960年頃迄沿岸部でみられたアマモの移植や播種試験, 1965年頃まで採れていたハマグリ養殖試験等を実施

-34-

した結果、海底の砂の移動が予想以上に大きいことや原因不明の水質変化による斃死等によりそれらを軌道にのせるにはまだ多くの問題が残された。

第3章 貧酸素水塊の生成と溶存酸素収支

3.1 貧酸素水塊の分布

3.1.1 目的

燧灘東部海域では1960年代の末期から夏期に底層水の酸素濃度の低下が観測されるようになり、1970年8月に初めて水産被害を生じるに至った。一般に魚類は DO 濃度 2~3 ml/l (2.9~4.3 mg/l) 以下で忌避行動、摂餌率減少がみられるようになり、1~2 ml/l が致死濃度とされており、魚介類の幼稚仔や逃避行動を取れない底生生物は壊滅的な打撃を受ける(風呂田,1988., 清水,1988., 今林,1989., 玉井,1990., 平田, 門勝,1990)。

これまで述べたように燧灘では、富栄養化が進行していることが明らかになったので、その影響の現われとしての貧酸素水塊が形成される時期とその分布海域を明らかにするとともに、その形成機構の解明を目的として調査、観測を行った。

3.1.2 調査方法

貧酸素水塊の分布を主目的とした調査は、先ず1977年8月5~7日に燧灘東部海域をほぼ網羅できるように図19に示す35測点で香川大学農学部付属庵治浅海域環境実験実習施設の調査艇カラヌスを利用して実施された。次いで1983年9月1, 2日に東京大学海洋研究所の淡青丸航海(83-KT-15)において図20に示す南北2測線、東西1測線について調査観測を行った。

水温及び DO の測定は1977年8月には米国マーティック社製水質分析計 Mark III を用いて行った。1983年9月には米国 YSI 社製 DO メータ58型を用いて観測した。

3.1.3 結果

1977年の観測結果をもとに、観測点のなかから東西に6測線を設定し、水温及び DO の鉛直断面を図21に示した。また南北に1測線を設けて同様に鉛直断面をとり、図22に示した(越智ら, 1978)。

水温は測点 E 1 の表層が最高で31.6℃, 最低は測点 A 5 の水深29mで20.6℃を記録した。表層水と水深25mの底層水の温度差は約8℃であった。水温躍層は場所により多少異なり、水深4mから10mの間にあり、特に測点 A 1 の水深6mと7mにおける温度勾配は3.2℃/mに達していた。底層水の水温は南部に比べて北部でやや低い傾向が認められ、特に測点 A 7 と C 4 を結ぶ線を中心に幅4kmないし5kmの海域が特に低く、21℃以下であった。香川県三崎沖の測点 A 8 は備讃瀬戸の領域に入り、よく混合されており、温度躍層は認められなかった。また、南部の測点 F 5 辺りになると躍層は幾分緩む傾向を示した。以上のようにこの時期には南北両端のごく一部の海域を除いた他は著しく成層が発達し、鉛直的に極めて安定な水塊構造を示した。

DO は表層水については過飽和状態で水深5~8mに極大層が観測された。それ以深は低下の一途をたどるが、6~15m付近に DO の躍層が認められる。測点 B 1 では水深6mから7mの間に温度躍層が認められ、DO の濃度差が2.8 mg/l にもなった。一般に DO 躍層は温度躍層と同一水深か、または数m深いところに認められ、20m以深では DO が 2 mg/l 以下に低下していた。海底上1mの海水の DO が 1 mg/l 以下の海域は図23に示すように伊予三島港の西方から三崎に至る広い海域で確認され、調査海域の約50%を占めている。この貧酸素域の分布は図24に示すように、底層水の水温が22℃以下の水域分布と一致している。塩分は30.9~31.3%の範囲に入り、上下層の差はいずれも0.4%以下であった。なお、これらの海域の底層水には明らかに硫化水素臭が感じられた。

1983年9月の水温と DO の調査結果を図25にそれぞれ示した(Ochi and Takeoka, 1986)。測点12から30に

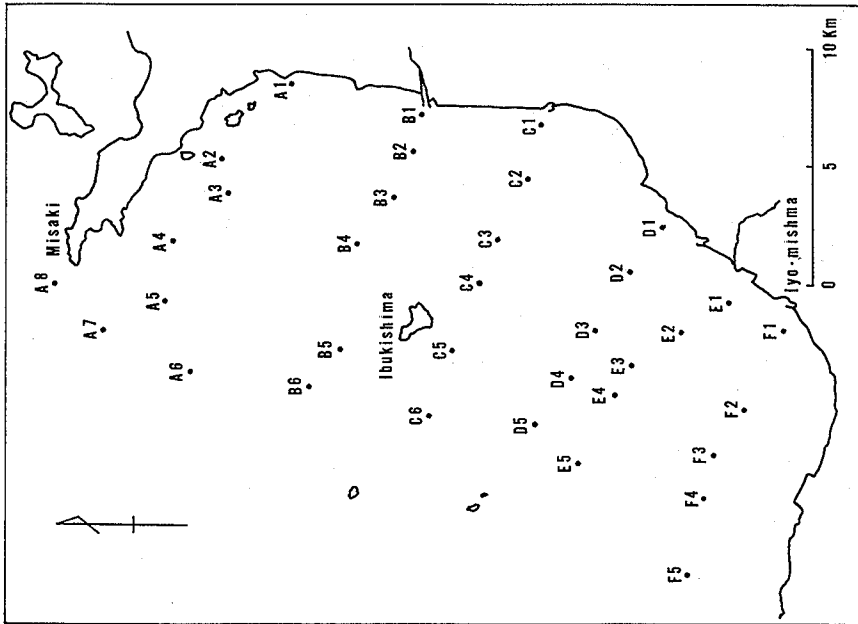


Fig. 19 Location of the observation stations for anoxic water mass in August 5 to 7, 1977.

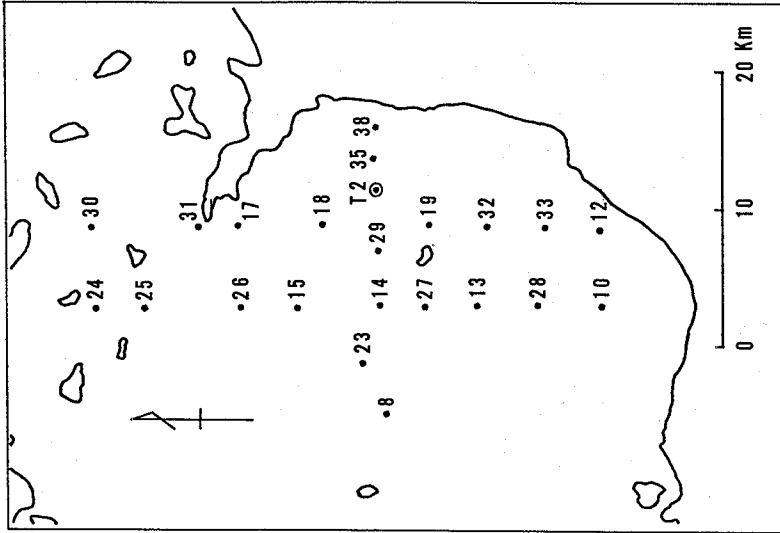


Fig. 20 Location of the observation stations for anoxic water mass in September 1 to 2, 1983.

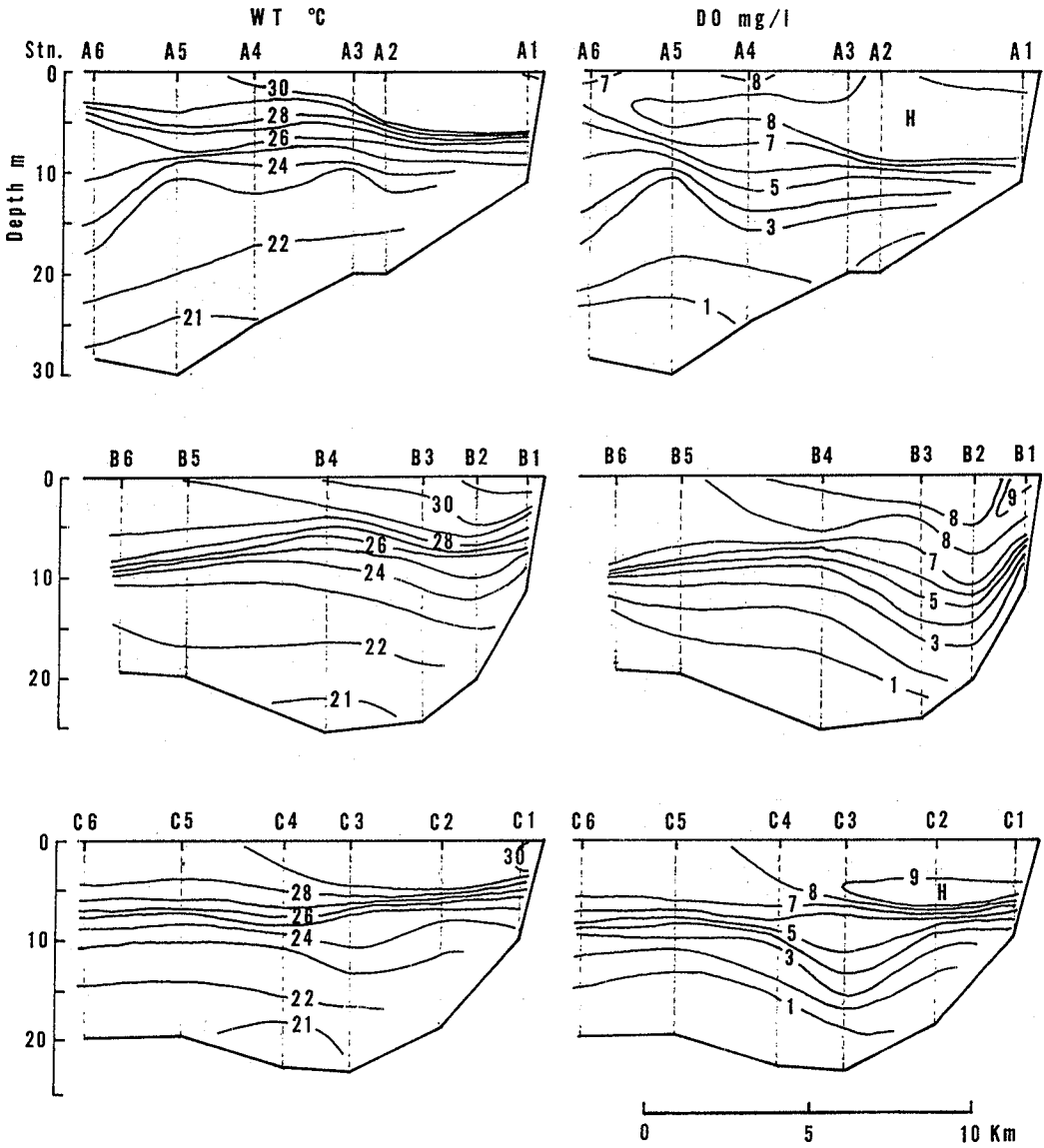


Fig 21 Vertical sections of water temperature and dissolved oxygen in Eastern Hiuchi Nada in August 5 to 7, 1977.

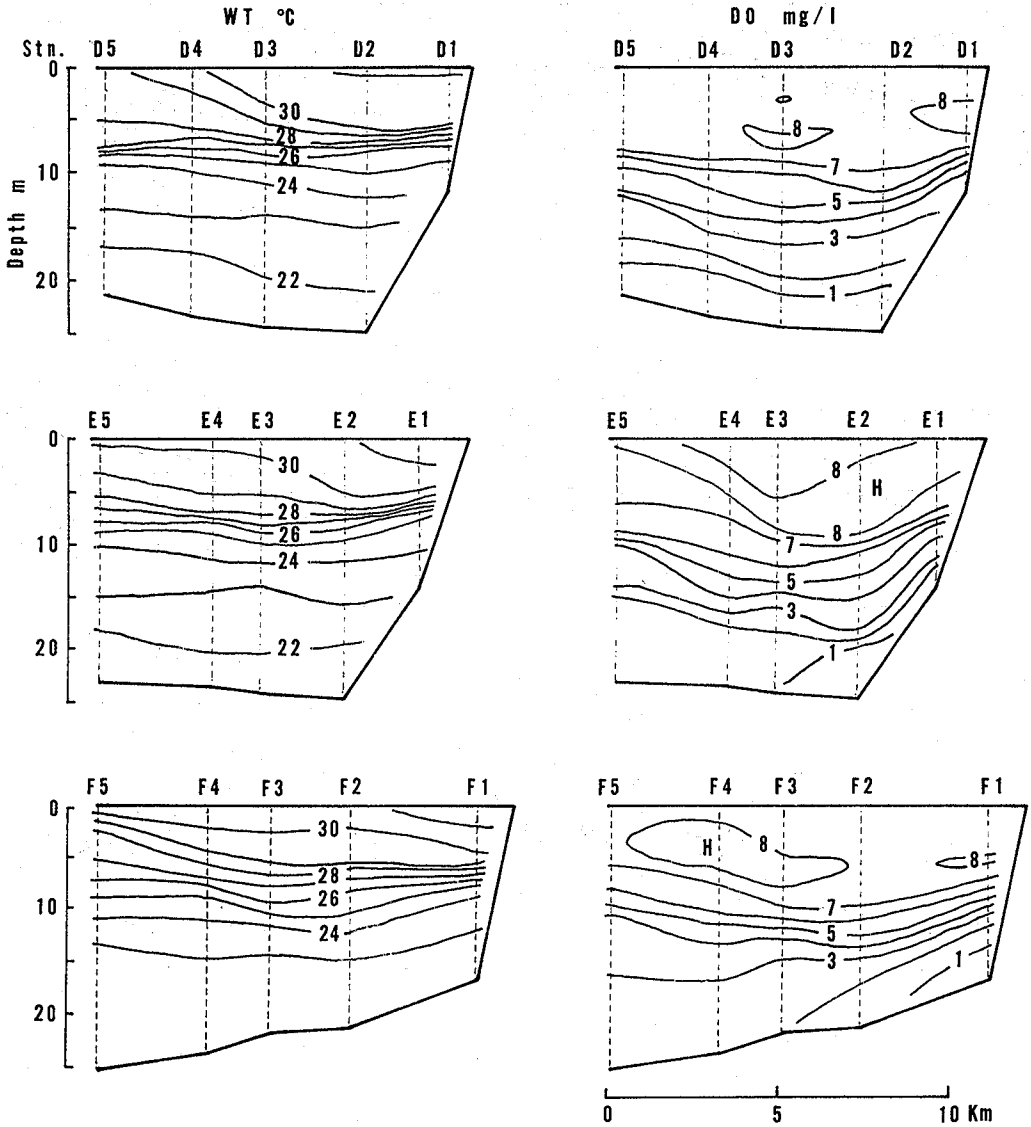


Fig. 21 (Continued)

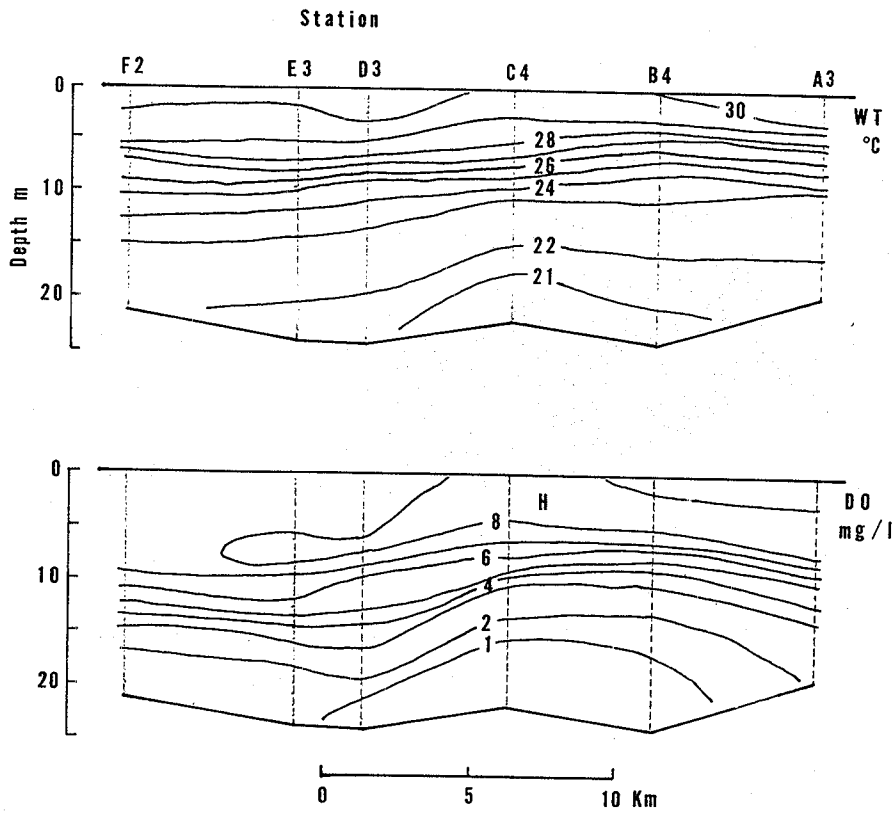


Fig. 22 Vertical sections of water temperature and dissolved oxygen on north and south lines in August 1977

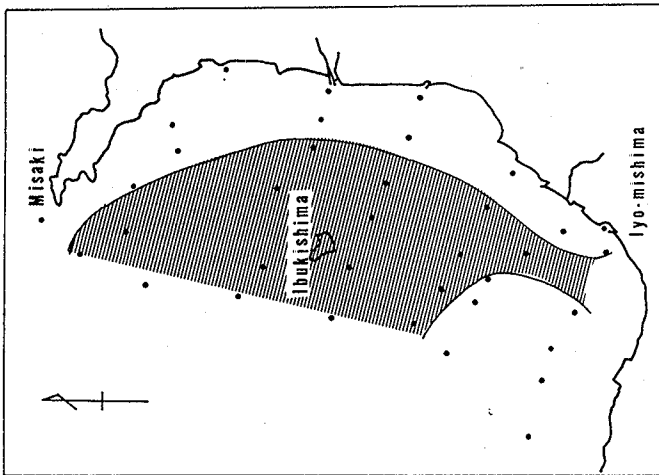


Fig. 23 Distribution of anoxic water mass which contained less than 1mg/l of dissolved oxygen located one meter above bottom in August 5 to 10, 1977.

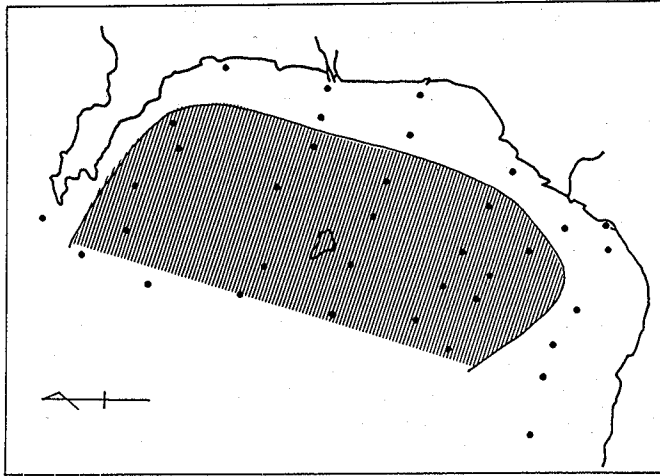


Fig. 24 Distribution of cold water mass which was below 22°C of water temperature located one meter above bottom in August 5 to 10, 1977.

1983年9月の水温とDOの調査結果を図25にそれぞれ示した(Ochi and Takeoka, 1986)。測点12から30に至る南北測線についてみると、表層水温は約28℃、底層水温は25℃台で最低は測点19で25.1℃であった。

DOは表層及び中層で6 mg/l以上であったが、底層水では急激な低下がみられた。概して水温が26℃以下でDOは4 mg/l以下となっており、測点19が最も低く1.1 mg/lであった。低温で酸素の少ない水塊の上面は必ずしも水平ではなく、時計皿を海底に伏せたように中央部が盛り上がった形状を呈していた。沖合の測点10から24に至る南北測線は香川県寄りの測線12~30に比べて底層水温が0.5℃高く、DOは1~2 mg/l程度高い傾向が認められ、DOの最低は測点13の1.95 mg/lであった。東部海域の北西部にあたる測点15及び26付近は備讃瀬戸の潮流の影響を受けており成層はほとんど認められなかった。ただ、北方の測点25及び26には伊吹島近辺の水温よりも更に低温で、DO濃度の低い水塊が検出された。測点8から38を結ぶ東西の測線については水深20mを超える東部の測点29、T2、35付近のくぼみに低温で酸素の少ない水塊が認められた。

以上のように低温でしかもDOの低い水塊の分布は、燧灘東部海域の20m以深の海域に限られ、この調査期間を通じて伊吹島の北北東約7 km 付近が最も貧酸素化の著しい海域といえる。

3. 1. 4 考 察

燧灘で貧酸素水塊が形成されるのは東部海域で、その中でも伊予三島、川之江市の沿岸域とその北方に延びる水深20m以上の海域に限られる。貧酸素水塊と冷水塊の分布は一致しており、東部海域の海溝部の海底にへばりつく形で分布している。貧酸素水塊(DO 3mg/l以下)の厚みは5~15mであるが、特に海底から5mの範囲のDO低下が著しい。

貧酸素水塊の上面は必ずしも水平ではなく緩い傾斜があるようである。それが内部波によるものか潮汐流におされて変形しているのかは明かでない。ただ、東部海域の潮流は極めて弱く10 cm/sec以下であり水分子が1周期間に往復運動をする範囲は1.5 Km程度以下であり、他の分潮流を加えた場合を考えても数 Km以下である。そのため潮流による水の運動は僅かな距離の往復運動に過ぎない。その結果、重い水塊は海溝部によどんでいるものと考えられる。また潮流が遅いということは懸濁粒子の底層への沈降・集積を促すことにつながる。それは2. 1. 3で述べたように堆積物中の有機炭素濃度やフェオ色素濃度の分布と貧酸素水塊のそれが一致することからも明らかである。

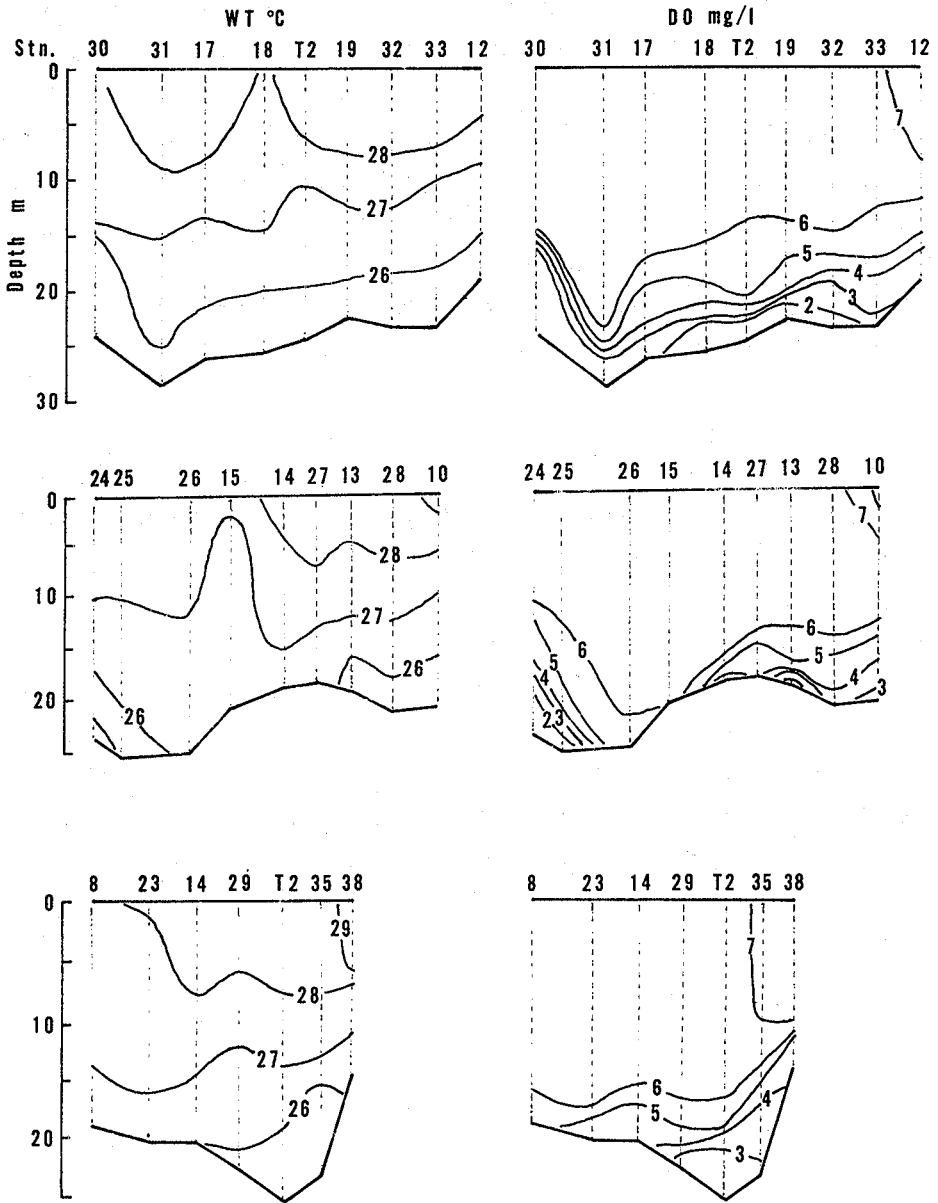


Fig. 25 Vertical sections of water temperature and dissolved oxygen in September 1983.

3. 2 貧酸素水塊の成因と季節的消長

3. 2. 1 目 的

燧灘東部海域は西部海域に比べて、高水温時に上下の温度差が大きく、DO低下が著しいことが明らかとなったので、ここでは成層の鉛直構造を明らかにすると共に、成層化の進行と貧酸素水塊の消長の相互関係を解明することを目的とした。

3. 2. 2 調査方法

図20に示した測点T2において1982年、83年の夏期にはほぼ2週間間隔で漁船を利用して水温とDOの観測を行った。水温及びDOの観測に使用した機器類は3.1.2に述べたとおりである。

3. 2. 3 結 果

1982年及び83年の6月から9月にかけて約2週間に一度の割合で図20に示した測点T2において水温とDOの季節変化を調べた結果を図26と27に示した。

1982年には6月中旬に表層と底層の水温差が6.5℃もあり、水深5～7mと15～18mにそれぞれ温度勾配1.1及び0.6℃/mを有する二重の水温躍層が観測された。その後7月中、下旬及び8月中旬に雨天が続き日照不足となったために成層が崩れかけたがその後又回復した。しかし、9月上旬には完全に成層が崩れ、循環期に入った。

一方、DOについては、6月中旬にはそれほど貧酸素化しておらず、底泥直上で5.58 mg/lであった。その後徐々に貧酸素化の傾向を示し7月13日には3.6 mg/lに低下した。ところが7月27日には4.65 mg/lまで一時的に回復し、8月24日には再び3.4 mg/lまで低下した。そして9月上旬に起こった成層の崩壊とともに貧酸素水塊も消滅した。

1983年には7月中旬と8月上旬に成層がゆるみ、概して82年とはほぼ同じように躍層の発達と衰退を繰り返した。DOは8月9日に2.5 mg/lまで低下し、8月中旬には一時5.25 mg/lまで回復したが、その後の好天続きで9月2日には再び減少し1.3 mg/lを記録した。

燧灘東部海域における貧酸素水塊形成の物理条件として密度成層の形成があげられる。本海域に流入する河川はいずれも小さく、水量も限られているので大量の降雨があった時以外は陸水の流入による表層水の塩分低下はほとんど問題にならない。従って、上下の水温差に基づく密度差が成層形成に大きく寄与している。

以上のように、この海域では上下の水温差は4～7℃で、水温躍層は水深5～15mに形成される比較的層の厚いものの他に、底泥上5m付近に薄い躍層が形成されるのが特徴的である。前者を第1躍層、後者を第2躍層と呼ぶことにする。典型的な例として1982年8月24日に観測された第2躍層が明らかなもの、及び1983年8月26日に観測された第1躍層のみのものをそれぞれ図28と29に示した。DOは図より明らかなように中層付近に極大があり、表・中層はほぼ過飽和となっている。特に貧酸素水塊と呼ばれるものは20m以深に認められ、DO濃度の躍層は第2水温躍層によく対応しており、その下は底泥直上付近までほぼ等濃度となっている。本海域の成層期の透明度は8～12mであり、表層から中層にかけて形成される第1躍層は貧酸素化と無関係で、補償深度またはそれ以深に形成される第2躍層が底層の貧酸素化にとって特に重要である。

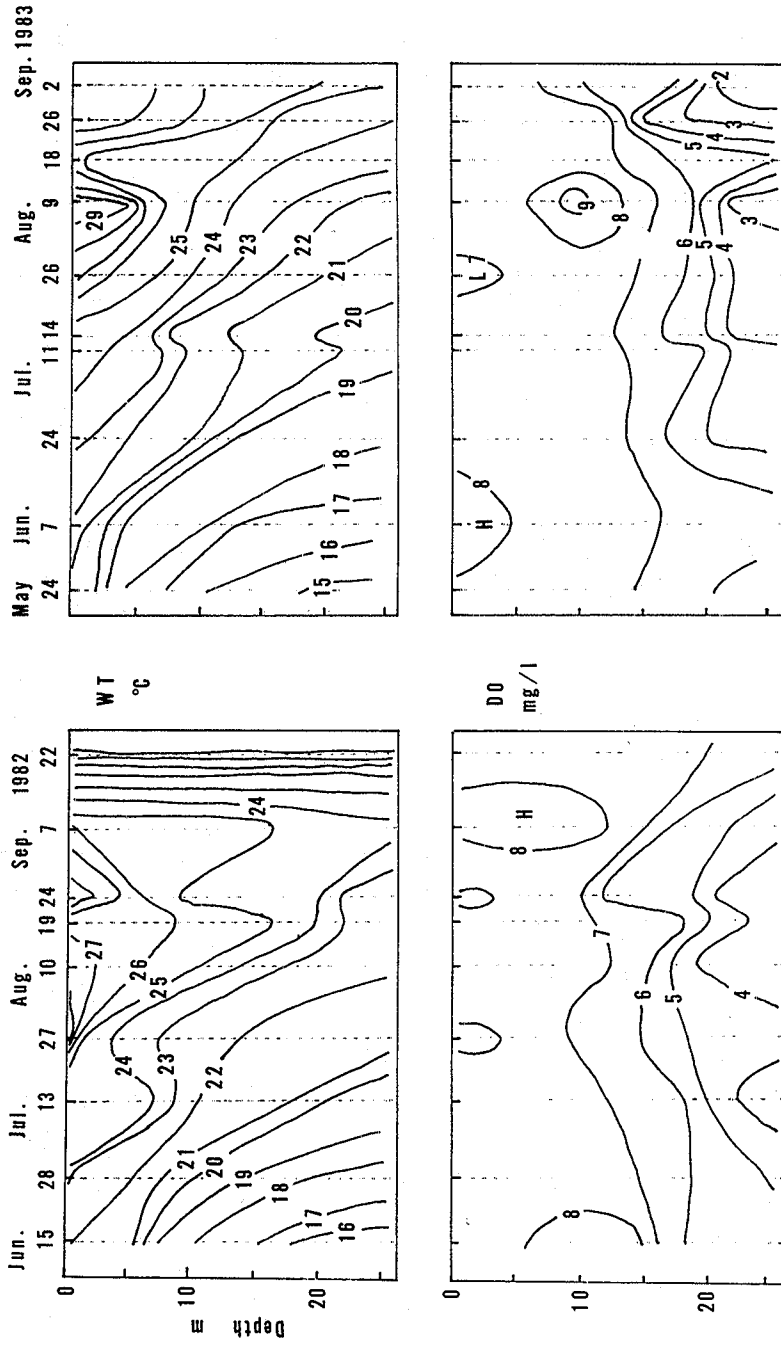


Fig. 26 Fluctuations of water temperature and dissolved oxygen at Staion T2 during the summer season in 1982.

Fig. 27 Fluctuations of water temperature and dissolved oxygen at Station T2 during the summer season in 1983

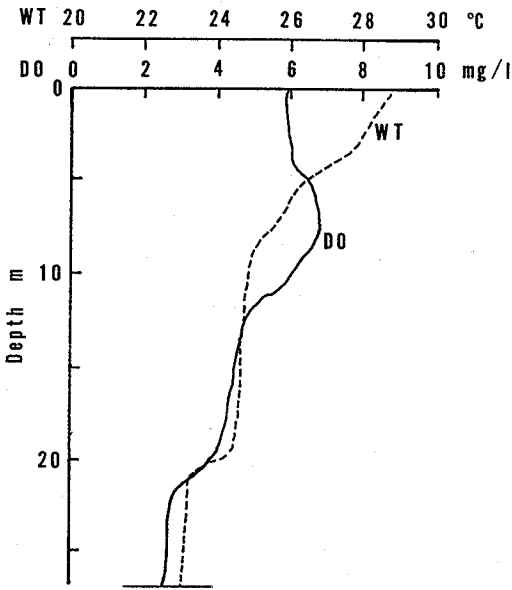


Fig. 28 Vertical distribution of water temperature and DO detected as double thermocline at August 24, 1982

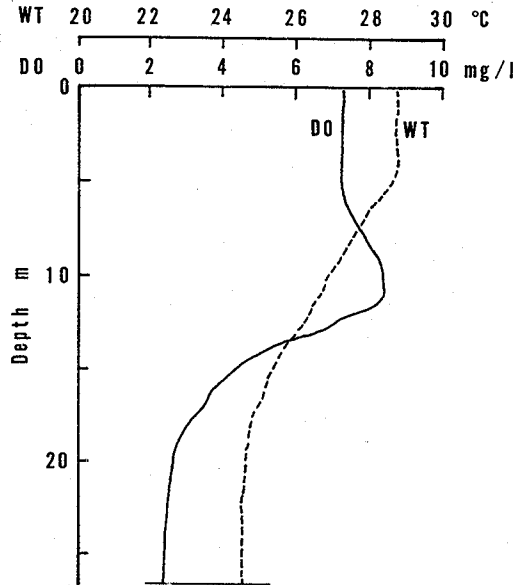


Fig. 29 Vertical distribution of water temperature and DO detected as single thermocline at August 26, 1983.

3. 2. 4 考 察

日本で貧酸素水塊または無酸素水塊が観測される海域として東京湾（鬼塚，1989），三河湾（佐々木ら，1978；佐々木，1989），大阪湾（城ら，1984；城，1989），大村湾（飯塚，1989）等があげられる。米国においても Chesapeake Bay（Officer, C. B., *et al*, 1984），New York Bight 等で季節的に生じ，魚介類を斃死させていることが報告されている。これらの海域はいずれも夏期に成層が形成されるが，その物理的成因は海域毎に異なっている。東京湾，三河湾，大阪湾ではどちらかと言えば上下の塩分差の寄与が大きいが，大村湾や燧灘では上下の温度差の寄与が大きい。また潮流も比較的弱いために上下の海水の混合が十分に行われないものと考えられる。化学的には底層水ないしは海底に運ばれる酸素消費者である有機物の供給量が躍層を通して底層に運ばれる酸素供給量を上回っていることは明白であるが，有機物の最大許容供給量はそれぞれの海域の成層強度によって変わる。なお，これまで燧灘では東京湾でみられる青潮現象（環境庁，1988；風呂田，1987）は観測されていない。

燧灘東部海域の成層形成の主因は温度躍層によって次のように説明される。多量の降雨の後においては陸水の流入によって表面に低塩分水の分布がみられるが，それ以外では上下の塩分差は0.4%以下である。一方，水温較差は夏期には4～7℃に達する。水温躍層は表層から中層にかけて出現する第1躍層と海底上5m付近に出現する第2躍層の二つが観測される。第2躍層の下には冷水塊が存在し，それは東部海域の海底に南北に長く分布しており，この冷水塊と周囲の海水との境界が第2躍層となっていることがわかる。第2躍層の維持形成の物理的

機構は十分に検討されていないが、底層水の流動が表層及び中層水のそれに比べて極端に遅いことと、水温が上昇期に入っても底層水は海底泥によって絶えず熱が奪われているために冷水塊を生じ、中層水との間に温度躍層が形成されるものと推察される。DO 極大層は中層付近にあり、基礎生産がかなり深くまでおよんでいることを考えれば、第1躍層は貧酸素化とは関係が薄いと考えられる(越智、武岡, 1985)。

1982年の貧酸素化の程度は従来のそれに比べて弱かったが、気象条件に一因があったと思われる。測点T2から約20 Km 離れた多度津測候所の記録(日本気象協会高松支部, 1982~83)によれば、82年6月中旬から下旬にかけての降水量は26.5 mm で、平年値の212 mm に比べて少なかったが、7月中旬から8月上旬にかけては平年の3.4倍の271 mm におよぶ降雨があり、関連して日照時間も制限された。一般に降雨によって表層の塩分が低下することから成層が強くなると考えられるが、ここでは雨量の多い時には極表層を除いて逆に成層が弱くなっており、降雨自身が直接的に成層を変動させてはいない。また、武岡、越智(1985)によれば平均風速10 m/sec 程度の風が1日近く持続してもこの海域の成層自体に大きな影響はなかった。

以上のことから、この海域での成層の強さの季節変動は、主として海面を通しての熱の輸送量の変動が強く関与しているものと思われる。

そこで1982年と83年の多度津町における夏期の日照時間を香川県気象月報(1982, 1983)より求め図30と31に示した。82年には7月中旬と8月中旬に日照時間が少なくなっており、これに応じて成層も緩み、底層まで酸素が運ばれたと考えられる。そして9月上旬の天候不順によって一気に成層が崩壊し、同時に貧酸素水塊が消失した。1983年には7月中旬に極端に日照不足があり、8月中旬にも日照の少ない日が4日程みられた。これらの影響が水温やDOの鉛直分布に明瞭に表われており、海面に到達する太陽放射エネルギーの多少が貧酸素水塊の形成に大きく関与していると推察された。

図27によれば8月中旬の躍層崩壊の後、短期間で再度成層が形成され、8月上旬以上に貧酸素化が進行している。成層が崩れた後には水深15mくらいまで栄養塩の上昇がみられ、水深10~20mの間でクロロフィルa濃度の増加が観測される。これは成層の崩壊によってそれまでに底層水中に貯えられていた栄養塩が有光層に運ばれ、その後の日照の回復によって急激に植物プランクトンが増殖して、その後1週間ないし10日間で栄養塩が涸渇するために死滅、沈降したプランクトンによって急激にDOが消費されたためと考えられる。

1980年以降の他の観測についても長期に安定な成層が形成されるだけでは極度の貧酸素化は起こらず、一方、一時的に成層が崩れた後で好天が続いた時にしばしばより著しい酸欠が起こることが確認されている。すなわち、梅雨明けから晴天が続いた場合、安定な成層が形成され、これが底層から上層への栄養塩の補給を妨げるために上層での植物プランクトンの増殖及び光合成が抑えられ、そのために底層水への易分解性有機物の供給が少なくなる。その結果、底層水中の酸素消費も低く抑えられることになり、DOの低下も少なくなる。事実、晴天が永く続いている場合には、東部海域の沖合はプランクトンが少なく、内湾域としては異常に透明度が高くなり、約12mに達する。以上のように本海域では1970年代にはパルプ排水により著しく有機汚染を受けた海底泥による酸素消費によって貧酸素水を生じたが、その後は植物プランクトンの増殖による有機物の生産が寄与する割合が高いと考えられる。また貧酸素水塊の形成には必ずしも長期に亘る安定な成層化が必須条件ではなく、比較的短期間で生じることが明かとなった。

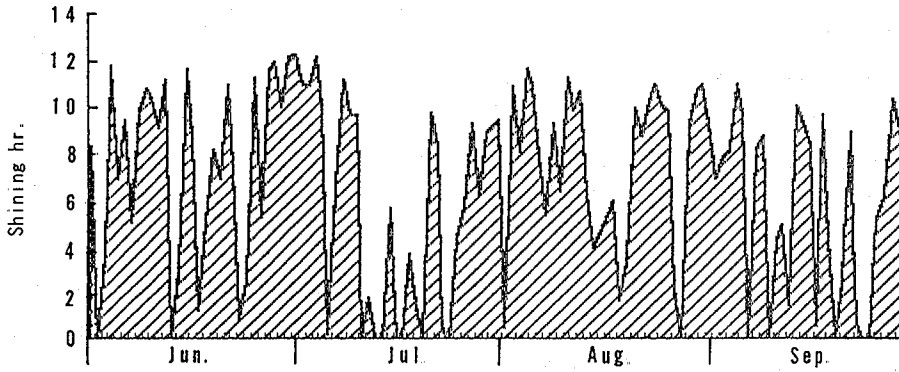


Fig. 30 Fluctuation of shining hour during the summer season in 1982 at Tadotsu meteorological station.

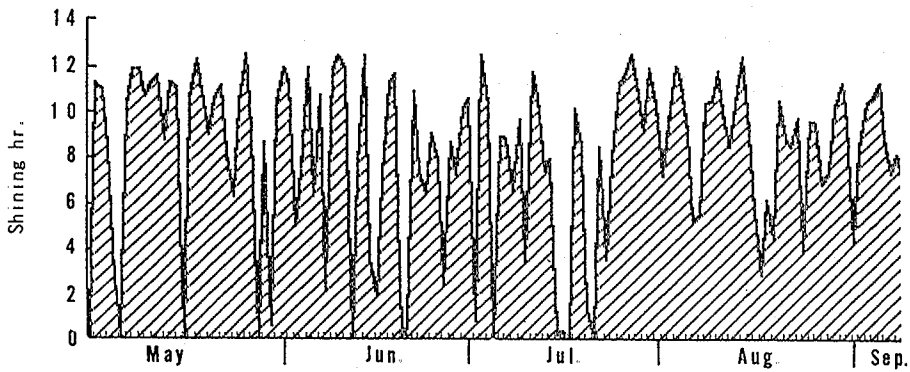


Fig. 31 Fluctuation of shining hour during the summer season in 1983 at Tadotsu meteorological station.

3. 3 底層水の溶存酸素収支

3. 3. 1 目 的

本海域では貧酸素水塊が海底上 5 m 付近に形成される第 2 温度躍層の下に出現することが明らかとなった。そこでこの第 2 躍層下での酸素消費を海底泥、底層水、新生沈澱物それぞれに大別して求め、躍層下の基礎生産による酸素生産を測定することによって第 2 躍層を通して行われる酸素の供給速度を見積り、底層水の酸素収支を明らかにすることを目的とした。

3. 2. 2 調査及び実験方法

東部海域の貧酸素水塊形成には底層水中での酸素消費が特に問題になるので、貧酸素水塊の出現する伊吹島北東の測点 T 2 (図 20 参照) で懸濁物を含めた底層水、海底泥、それに動的な側面として沈降物を加え、これらの酸素消費速度を測定した。現場での実験は 1982 年と 1983 年に実施した。

底層水の酸素消費は 300 ml 容の培養びんに海水を満たし、現場に 24 時間保持し、その間の酸素消費量から求めた。また、明暗瓶法により、基礎生産量の測定もあわせて行った。

海底泥による酸素消費は 1983 年 6 月 8 日、7 月 16 日、8 月 23 日、8 月 27 日の 4 回、ベルジャー型のチャンパー (図 32) を海底に設置して求めた。ベルジャーは星加ら (1980)、Bowman and Delfino (1980) の現場用溶出量測定装置を参考に試作したもので、内径 60 cm、内容積 44 l の塩ビ製で、これを設置する際には潜水して極力底泥を攪拌しないように配慮した。まず、アルミ製の外枠が着底後 30 分程してからベルジャー本体を静かに所定の深さまで海底に貫入させた。その際の貫入速度は自重によると速すぎるので、上部に取り付けたピストンに吸い込む水の速度を細孔で制限することによって調節した。ベルジャー本体の設置を確認してから循環ポンプを作動させ内部の水を約 15 分間排除し、最後に蓋をして密閉し、海水を循環させた。ベルジャー内の水の攪拌は内径 8 mm のホースで船上のポンプ (1.5 l/min) に導き、ベルジャーと船上のポンプとの間を循環することに頼り、その他の機器は使用しなかった。なお、船上のポンプの後に DO センサーを挿入し、また採水コックも取り付け、適宜採水できるようにした。

沈降物の捕集は内径 16 cm、高さ 45 cm の塩ビ管で作製したセジメントトラップを海底上 2 m 及び 7 m に 2 個を 1 組にして 4 基を一昼夜設置して行った。更に回収後、1 基分の沈降物の一定量を培養びんにとり、一昼夜培養して酸素消費量を求めた。

3. 3. 3 結 果

培養ビンを用いて測定した底層水の酸素消費速度は平均 0.21 mg/l/day (変動係数 50%) となった。海底上約 5 m に温度躍層があることより、その下層の水柱の酸素消費は $1.05 \text{ g/m}^2/\text{day}$ となる。

ベルジャーを用いて測定した海底泥による酸素消費の測定結果は図 33 に示すように初めの約 3 時間は酸素の減少速度がやや速いが、その後は一定速度となった。装置を海底に設置する際にベルジャーの外壁が丁度 10 cm 海底泥に貫入することになるので、そこから浸み出る間隙水の影響と考え、後の値から底層水の酸素消費を求めた。ベルジャー内の DO 減少量から、底層水そのものの DO 消費分を補正して、底泥表面に由来する酸素消費速度を求めた結果、 $0.49 \text{ g/m}^2/\text{day}$ が得られた。

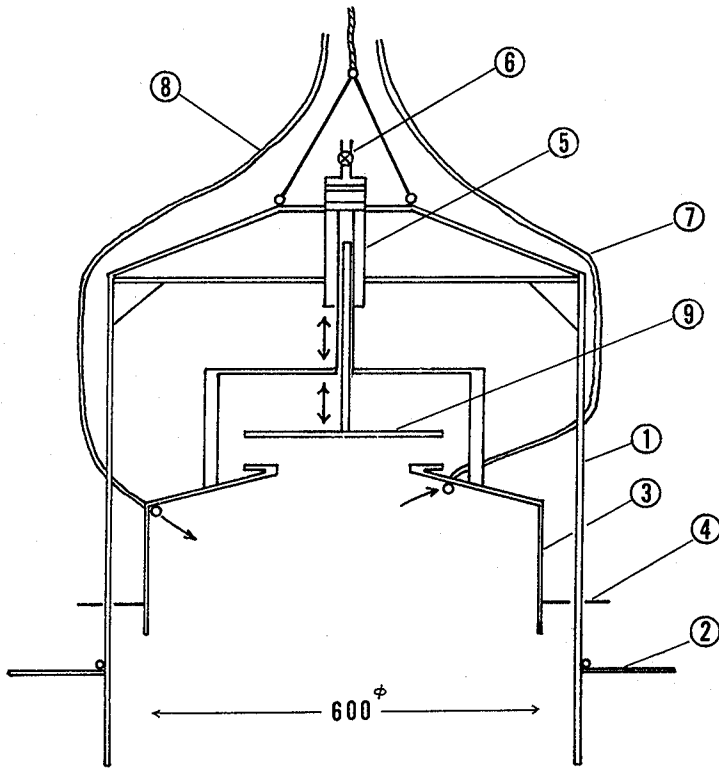


Fig. 32 Schematic diagram of an instrument for in situ measuring oxygen uptake and nutrient release from sediment.

- 1 : Flame 2 : Fringe 3 : Submerged chamber 4 : Guide 5 : Piston cylinder
 6 : Fine hole 7, 8 : Vinyl tube 9 : Lid

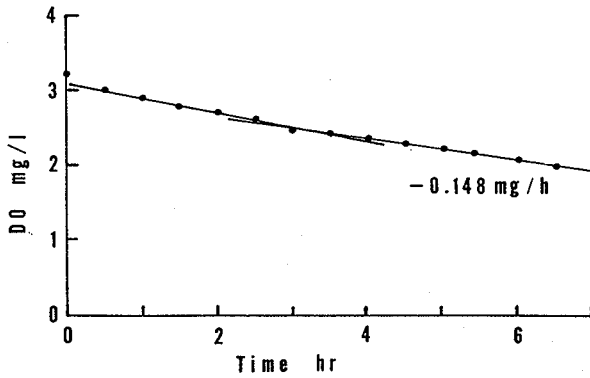


Fig 33 Decrease of DO in survey vessel (shown in Fig. 32) covering sediment at Station T2

Table 10 Mass flux of settling matter and its DO consumption.

Date	Mass flux g/m ² /day	Org C flux g/m ² /day	DO consump. g/m ² /day
1982, Jul. 12	6.57	0.308	0.082
Jul. 26	21.10	0.575	0.055
Aug. 9	9.75	0.400	0.051
Aug. 23	6.65	0.254	0.050
Sep. 6	4.50	0.214	0.023
1983, Jun. 8	6.37	0.233	-----
Jun. 24	18.81	0.476	-----
Jul. 16	14.40	0.366	-----
Jul. 26	0.90	0.050	-----
Jul. 28	5.97	0.153	0.026
Aug. 27	12.90	0.648	-----
Average	9.81	0.334	0.048

海底上7mに設置したセジメントトラップによる沈降物の捕集結果を表9に示した。全質量の鉛直流束はその時々で大きく変動しており、0.9~21.1 g/m²/dayとなった。同時に海底上2mに設置したトラップには10倍以上の沈降物が捕集された。しかし同一深さでの回収量の変動を調べた結果、測定誤差は10%以内であった。スキューバダイビングにより潜水して肉眼で海水懸濁物を観察すると水深20m前後の第2躍層を境にして底層水が著しく濁っているのが認められ、その懸濁物粒子はあたかもボタン雪を連想させるごとく浮遊していた。粒子は直径0.5~1 cm程度の大きさで、淡黄緑色を呈し、長い糸を引いているものが数多く見受けられた。これらは比較的新しい植物プランクトンの遺骸がプランクトン由来の粘質物によって凝集したものと推察される。大型の懸濁粒子は潮が止まればかなり速やかに沈降し、潮が動き始めると再浮遊するものと思われる。海底付近の視界は懐中電灯を照らしても数10 cm以下であった。温度躍層の位置は経時観測によると潮時により刻々と変化し、底泥上約3~8mの範囲に観測されることより、底層の懸濁物の多い、いわゆる高濁度層の厚さも経時的に変化するものと考えられる。従って沈降物の回収量の変動はトラップの設置深度が海底上7mであったことから高濁度層中にトラップが入り込み、上層から沈降した沈降物以外に、底層の高濁度層中の浮遊懸濁物が入った可能性が考え

られる。しかし、沈降物と高濁度層中の浮遊懸濁物の割合を有機炭素、有機窒素、リン含量等によって明確にすることができなかったため、トラップで捕集されたもの全ての平均値を求めた結果、沈降物の鉛直流束は $9.8 \text{ g/m}^2/\text{day}$ となった。沈降物を分析した結果、有機炭素としての鉛直流束は $0.33 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であった。

この際捕集された沈降物の酸素消費速度を求めた結果は、 $0.048 \text{ g/m}^2/\text{day}$ となった。更に底層水の基礎生産量を測定した結果、純生産はマイナスではあるものの第2躍層直下でも光合成は行われており、酸素の生産量は $0.50 \text{ g/m}^2/\text{day}$ と見積られた。

3.3.4 考察

3.3.3で述べたように第2躍層下の5m水柱での酸素消費は懸濁物を含めた底層水によるものが $1.05 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、躍層を通して上から降下してくる沈降物による酸素消費が $0.05 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、底泥表面のそれは $0.49 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であった。一方、底層水中での光合成による酸素供給は $0.50 \text{ g/m}^2/\text{day}$ と見積られた。沈降物による酸素消費は相対的に少ないが、底層における全酸素消費を求めるには底層水と底泥表面の酸素消費の合計値だけでは不十分である。それはこれらの測定が密閉状態で行われているので、測定中に絶えず落下してくる沈降物による酸素消費を別に求めるて加える必要があると考えた。

これらをまとめると図34のようになり、躍層下での全酸素消費量は $1.59 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 、これから光合成による酸素生産を差し引くと $1.09 \text{ g/m}^2/\text{day}$ となる。すなわち、躍層を通して約 $1.1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ の酸素の輸送がなければ貧酸素化が更に進行することになる。この値は底層水中で酸素を消費して分解される有機物の供給が全て沈降物によるものとすれば少し過大である。すなわち、表・中層から底層に運ばれる有機炭素の流束は $0.33 \text{ g/m}^2/\text{day}$ であるから、これが完全酸化を受けると概略 $0.9 \text{ g/m}^2/\text{day}$ の酸素消費に相当する。しかし、底泥の分析結果より測点T2近辺は種々の物質の沈降集積域と考えられ、また懸濁物は潮汐流にのり、浅いところからより深く流れの弱い海域へと再沈澱を繰り返しながら、主として海底直上を運ばれるものと考えられる。更に低水温期に沈降蓄積された物質や、過去に著しく有機汚染を受けたものが高水温期になって分解が進行することも考えられる。

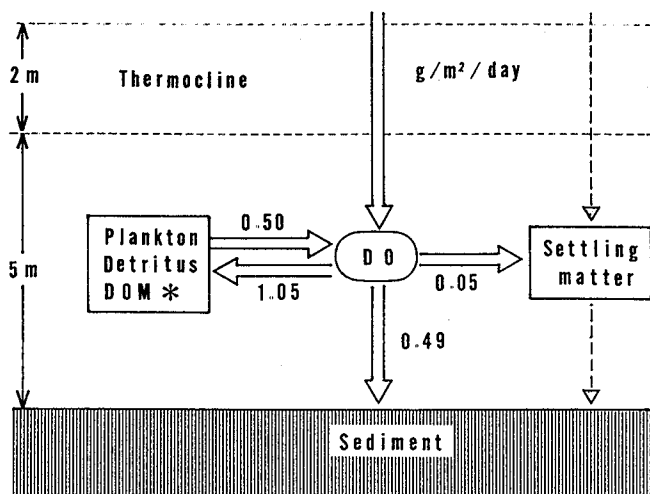


Fig. 34 DO budget below the second thermocline at Station T2.

* Dissolved organic matter

従って酸素収支を求めた時期の沈降物の流束と酸素消費は必ずしも一致しないと考える方がより妥当であるように思われる。

1983年8月18日の時点で温度躍層、酸素躍層ともに一時的に解消し、底泥直上水の DO は 5.25 mg/l であった (図31参照)。この時点の底泥表面から上方5 mまでの単位水柱当りの酸素の現存量は 27.7 g/m^2 と見積られた。ところがその後好天が続いたために躍層が再び形成され、8月25日には底泥直上水の DO は 3.7 mg/l 、9月1日には 2.05 mg/l にまで低下し、酸素の現存量でみると同様にそれぞれ 19.3 及び 14.8 g/m^2 と減少した。これらの値からこの間の底層水の酸素はそれぞれ 1.21 及び $0.64 \text{ g/m}^2/\text{day}$ の割合で減少したことになる。以上の結果からみる限り、先に見積った第2躍層下における酸素要求量 $1.1 \text{ g/m}^2/\text{day}$ は過大ではなく、平均的にはほぼ満足すべきものであると考えられる。

一方、半田ら (1984) は第2躍層下で分解される有機物量から DO 消費量を求めている。底層水上端での有機物の下向きのフラックスと、海底への有機物の堆積速度の差から、その間で分解される有機物量が解り、それによる酸素消費量が求まる。さらに海底に堆積する有機物量から堆積物中で分解されずに埋没してしまう有機物量を差し引いた有機物量からそれによる酸素消費量を求めている。そしてこの両者を合計したものとして $0.68 \text{ g/m}^2/\text{day}$ を得ている。半田の求めた値は、著者の実測値とかなりよく一致しているといえよう。

今、底層水が潮汐流による移動はあるものの M2 分潮流の振幅が 10 cm/sec 以下であることより、一潮時の間では、底層水は他の水塊と混合することなく同じ海域を往復しているだけで、水平移流による酸素供給がないとすれば底層水の酸素要求量に見合う酸素が躍層を通じて運び込まれない限り酸欠が進行することになる。

そこで消費と供給が釣り合っており、短期的には定常状態にあるものとして、第2躍層の鉛直拡散係数を求めることにする。第2躍層はその厚さが約2 mでこの範囲で温度が急激に低下し、その下層では水温はほぼ一定である。第2躍層の温度勾配は約 0.5°C/m 、酸素濃度勾配は 0.5 mg/m 程度であるので、この層を $1.09 \text{ g/m}^2/\text{day}$ の酸素が移動するものとして次式により鉛直拡散係数を求めた。

$$S = -Kd (\Delta C / \Delta D)$$

S ; 酸素拡散量 ($\text{g/cm}^2/\text{sec}$) C ; DO 濃度差 (g/cm^3)
Kd ; 鉛直拡散係数 (cm^2/sec) D ; 水深 (深さ方向を正, cm)

その結果、鉛直拡散係数として $0.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ が得られた。

従って、貧酸素化が進行するためには鉛直拡散係数は $0.5 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 以下でなければならないことになる。

一方、武岡、越智 (1985)、Takeoka *et al.* (1986) は同時期の水温上昇速度と温度勾配を熱輸送の観点から解析し、第2躍層の鉛直拡散係数は $0.10 \text{ cm}^2/\text{sec}$ であり、この海域で夏季に第2躍層以下に酸素が上方から輸送される量は底層水の酸素要求量を満足させることはできないことを明らかにしている。

以上のように図34に示した底層水中での酸素収支はこれらの研究成果からみてほぼ妥当であると判断された。

1970年代には DO が完全に0となることがしばしば観測されていたが、80年代に入ってから 2 mg/l を下回ることはいまとなつている。東部海域の成層強度は過去から変わりはないものと考えられることから、70年代はバルブ排水に由来する有機物によって消費される酸素の割合が高く、その上富栄養化による海域の内部生産物による酸素消費も多かったために極度に酸欠が進行したものと推察された。その後紙・パルプ工場から排出される有機物が約90%削減されたこと、及び海の富栄養からの回復傾向もうかがわれることより貧酸素化の程度も弱ま

るものと思われる。

3.4 要 約

1977年と1983年の夏季に燧灘東部海域において成層構造と貧酸素水塊の分布について調査した。その結果、貧酸素水塊の分布は伊予三島、川之江両市から2 Km 以内の沿岸域とその沖合の20m以深の海域に広く分布が確認された。東部海域の成層は主として水温躍層によって形成されており、塩分の寄与はほとんど観測されなかった。水温躍層は表層から中層にかけて形成される比較的層の厚い第1躍層と底泥上5 m付近に形成される層が薄く、温度勾配の急な第2躍層の二つが観測され、貧酸素水塊と密接な関わりを持つのは第2躍層であることが判明した。

水温躍層の形成と崩壊は海面を通して供給される太陽放射エネルギー量によって支配されており、放射エネルギーが少ない曇天ないしは雨天が4、5日続けば成層はくずれ、穏やかな晴天が1週間も続けば容易に成層が形成されることが明らかとなった。

夏季における燧灘東部の水深25mの海域において第2躍層下のDO収支を求めた結果、消費は底層水によるもの1.05、海中沈降物によるもの0.05、底泥表面によるものが0.49 g/m²/dayであり、全酸素消費は1.59 g/m²/dayとなった。一方、光合成による酸素供給は0.50 g/m²/dayと見積られた。従って上層から躍層を通じての酸素供給がないとすれば、実質1日当り1.1 g/m²の酸素が不足することになる。実際の貧酸素化の過程からみて第2躍層の鉛直拡散係数は0.5 cm²/sec以下と見積られ、一方海水中の水温の鉛直分布の経時変化をもとに熱輸送の観点から鉛直拡散係数を求めると0.1 cm²/secとなった。

1970年代には紙・パルプ製造工場から東部海域に排出されていた有機物による酸素消費が大きく、それに海域の富栄養化によって増殖する植物プランクトン起源の有機物による酸素消費が重なり極度の貧酸素化を招いたものと推察された。1980年代に入ってから酸素消費はプランクトン起源の有機物によるものが主になっており、貧酸素化の程度は弱まりDOが2.5 mg/lを下回ることはほとんど無くなった。

第4章 灘の窒素・リンを中心とした物質循環

4.1 栄養塩の再生及び季節変化

4.1.1 目的

燧灘ではIBPの一環として生態系の構造と機能の解明に関する研究(Hanaoka, 1977)が行われ、それらの結果に基づき全域における窒素循環図がまとめられている。

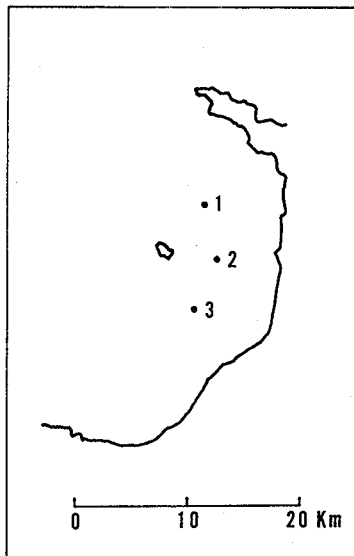
しかし、IBPにおける研究では富栄養に関する明確な視点が設定されておらず、また東部海域における汚染の実態把握が不十分であった。とくに貧酸素水塊の形成と関連した栄養塩類の底泥からの溶出は赤潮発生要因の一つとして考えられている(飯塚, 入江, 1969)。そこで、赤潮発生要因解明の意図も含めて、燧灘東部海域を一つの内湾モデルとして設定し、本海域の栄養塩の再生、及び栄養塩濃度の季節変化を明らかにすることを目的とした。

4.1.2 方法

図35に示すように3定点を設け、1979年6月から1981年2月までに計16回の調査を行った。採水は原則として2.5m間隔で行い、主としてリンとクロロフィル a の分析を行った。分析方法は2.1.2.2の水質分析法に準じた。また1982年と1983年にDO調査(3.2.2)と同時に栄養塩の調査もあわせて行った。

更に1983年の5月から8月にかけて6回の調査を図20の測点T2において実施し、無機態窒素、無機態リン、ケイ素の分析をテクニコンオートアナライザーによって行った。

Fig 35 Location of sampling stations for observation of seasonal variation of nutrients and suspended matter in sea water.



4.1.3 結果

結果は3定点の平均値で示すことにした。図36に示した全リン及び無機態リンの季節変化は、 1 m^2 の水柱の現存量を水深で除した値をプロットしたものである。これによれば全リンは6月から12月にかけて高く、2月から5月に低い値を示す周期のあることは明らかである。ただ、この周期は主として無機態リンの増減によるもので全リンと無機態リンの差、すなわち植物プランクトンを含む懸濁態リンと溶存有機態リンの含量は季節的にそれほどの変動を示さなかった。

全リンの平均濃度は $0.7\sim 0.8\mu\text{M/l}$ 程度、無機態リンのそれは $0.3\mu\text{M/l}$ 程度であり、富栄養化海域と言われているにもかかわらずそれほど大きいものではなかった。

図37に示す無機態リンの季節変化は、水深(20~25m)を3等分し、表層、中層、底層として3層それぞれの現存量を求めたものである。図から明らかなように成層期の底層中にリンが多いのが特徴的である。無機態リンの最高値は $2.84\mu\text{M/l}$ で1979年8月9日に測点3の底層水で得られた。表層水中のリンは成層期にはほとんど検出されず、涵濁していた。循環期には3層のリン現存量はほぼ同じであった。

クロロフィルaの現存量は図38に示すように変動が著しく、表・中層で必ずしも多いとは限らなかった。1979年7月27日には底層で高いが、1980年7月3日には表層で高い結果となり、同じ成層期でも気象条件に差があり、成層の形成、崩壊などに支配されるようである。循環期には現存量に差があるものの、層間のバラツキは少ない。

1983年の夏期のDOの変化は既に図27に示したように6月下旬から底層水中で貧酸素化が進行し始め8月9日には 2.5mg/l にまで低下した。その後成層が崩れ8月18日には 5.2mg/l にまで回復したものの、8月下旬には再び成層が形成され9月2日には最低 1.3mg/l を記録した。同時に行った栄養塩の分析結果を表層0~10m, 中層10~20, 底層20~25mの3層に分割し、無機態窒素、無機態リン、溶存ケイ酸の平均濃度としてそれぞれ図39, 40, 41に示した。

無機態窒素は、図39からわかるように、どの層でも変動が大きいものの、概して底層水中の濃度は $2.0\sim 6.2\mu\text{M/l}$ と高い。7月15日の表・中層は $0.85\mu\text{M/l}$ と著しく低くなっているが、それ以外では $1.3\sim 5.1\mu\text{M/l}$ の範囲にあった。無機態窒素の内訳をみるとアンモニア態窒素が55~92%で平均79%を占めていた。底層水中では6月24日まではアンモニア態窒素が80%以上であったが、7月15日には55%に急減した。残りの亜硝酸及び硝酸態窒素については表・中層ではやや硝酸態窒素が多いものの、底層水では亜硝酸態窒素が多くなっている。

無機態リンは図40に示すように底層水中では $0.26\sim 0.58\mu\text{M/l}$ の間で変動し、表層のそれは $0.08\sim 0.16\mu\text{M/l}$ であった。溶存ケイ酸も図41に示すように表層は $3.5\sim 13.5\mu\text{M/l}$ の範囲にあり、底層は $12.6\sim 33.4\mu\text{M/l}$ の範囲で表層から底層に向かって濃度増加がみられるが、その勾配は窒素やリンに比べてやや小さかった。

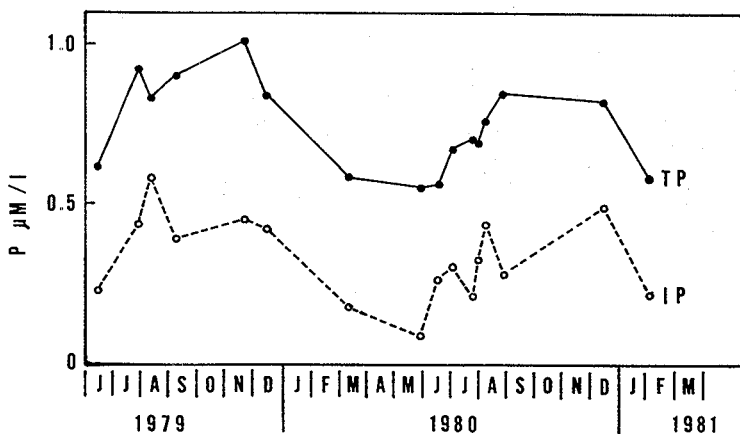


Fig. 36 Seasonal variations of phosphorus concentration from June 1979 to February 1981 (Average of 3 stations)

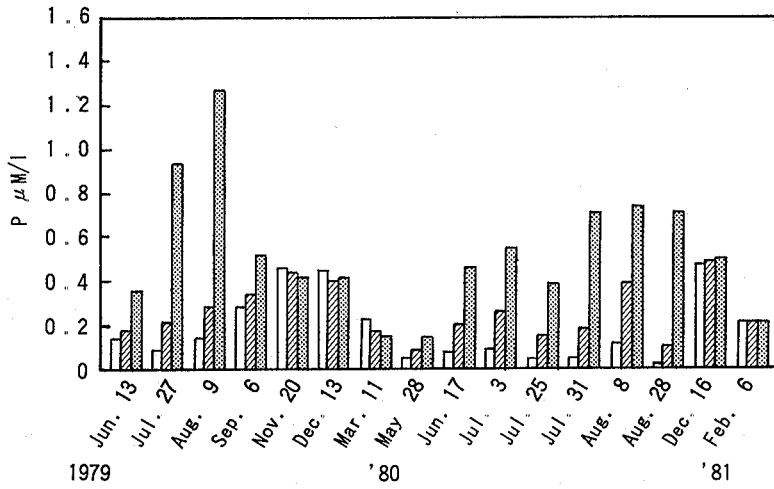


Fig. 37 Seasonal variations of phosphorus concentration from June 1979 to February 1981. (Average of 3 stations)
 □ Upper layer ▨ Middle layer ▩ Bottom layer

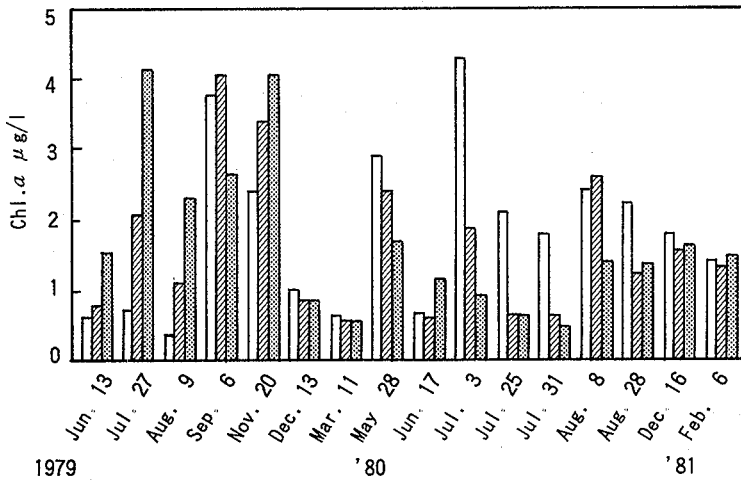


Fig. 38 Seasonal variations of chlorophyll a concentration from June 1979 to February 1981. (Average of 3 stations)
 □ Upper layer ▨ Middle layer ▩ Bottom layer

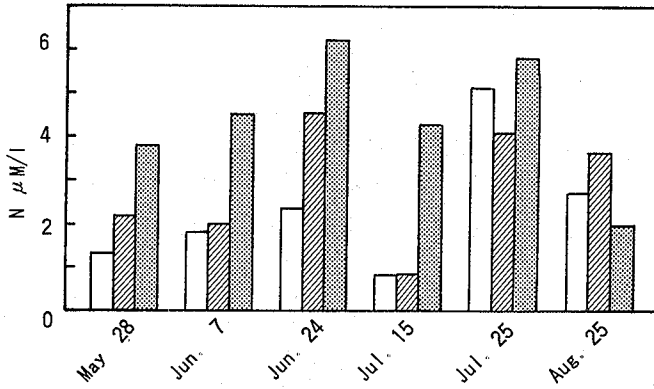


Fig. 39 Variations of inorganic nitrogen concentration during the summer season, 1983.

□ Upper layer ▨ Middle layer ▩ Bottom layer

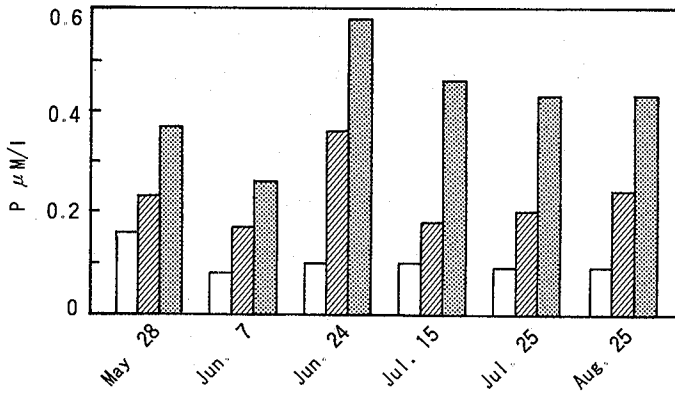


Fig. 40 Variations of phosphate concentration during the summer season, 1983.

□ Upper layer ▨ Middle layer ▩ Bottom layer

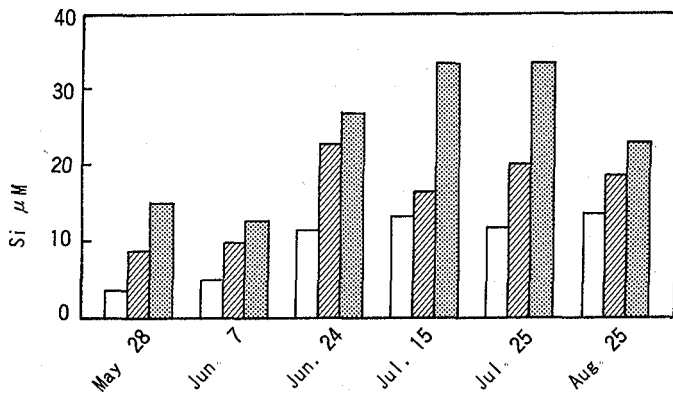


Fig. 41 Variations of silicate concentration during the summer season, 1983.

□ Upper layer ▨ Middle layer ▩ Bottom layer

4. 1. 4 考 察

1年半にわたり東部海域の貧酸素水塊が出現する水域で栄養塩であるリンの季節変化を調べた結果、無機態リンは $0.1 \sim 0.6 \mu\text{M/l}$ の間で、全リンは $0.6 \sim 1.0 \mu\text{M/l}$ の間にあり、その変化の様子は両者ではほぼ同じであった。しかし全リンの変動は無機態リンの増減によって支配されており、全リンと無機態リンの差、すなわち植物プランクトンを含めた懸濁態リン及び溶存態有機リンは約 $0.4 \mu\text{M/l}$ 程度でありあまり大きな変化は認められなかった。そして無機態リンは成層期には底層水中に高濃度に検出され、有光層である表・中層ではむしろリンが酒濁した状態であった。1982年8月24日の観測によれば水深20mにおける無機態リン濃度は $0.47 \mu\text{M/l}$ であり、同様に22.5mのそれは $0.67 \mu\text{M/l}$ であった。躍層の鉛直拡散係数を $0.1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ と仮定して躍層を通して上方に運ばれるリンを試算すると $2.1 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ となり、これは海底から再生されるリン $2.8 \text{ mg/m}^2/\text{day}$ (4. 3. 4 参照)の75%に相当する。

1983年に無機態リン、窒素及びケイ素について調べた結果、いずれも成層期に底層で高く表層で少ない傾向を示した。無機態窒素は主としてアンモニア態窒素が多く約8割を占め、これに亜硝酸態窒素が続き、硝酸態窒素が最も少なかった。

底層水中(15m以深)の窒素とリンの間には図42に示すように変動がおおきく一定の関係は認められなかった。ケイ素についても窒素と同様にリンとの相関を求めたところ図43の結果が得られ、 Si/P は49.3となり、植物プランクトンモデルの50 (Redfield *et al.*, 1963)にほぼ一致した。

1982年6月から9月にかけて測点T2において行った観測結果のうち、無機態リンとAOUの関係求めたのが図44である。AOU/Pは535となり、消費される酸素原子数が著しく多く、RKRモデルの276に比して1.9倍大きい値となった。すなわち、リンの再生なしに多量のDOを消費していることになる。その理由として、先ずこの海域の底泥がパルプ排水に由来するセルロース、リグニン等の窒素やリンを含まない有機物によって著しく汚染を受けたことがあげられる。また、灘の東部海域の20m以深の海底が種々の懸濁粒子の沈降、集積域となつて

いるために、ある程度分解が進み窒素やリンが溶脱した有機物が多量に運び込まれていることも影響していると思われる。

釜灘東部海域の成層期の底層水中の無機態リン濃度は1970年代には $2 \mu\text{M/l}$ をしばしば超えていたが、1980年以降は貧酸素化の程度の弱まりとともにリン濃度も $1 \mu\text{M/l}$ を超えることは無くなった。このように底層中の無機態リン濃度は貧酸素化の程度によって左右されていることがうかがわれる。

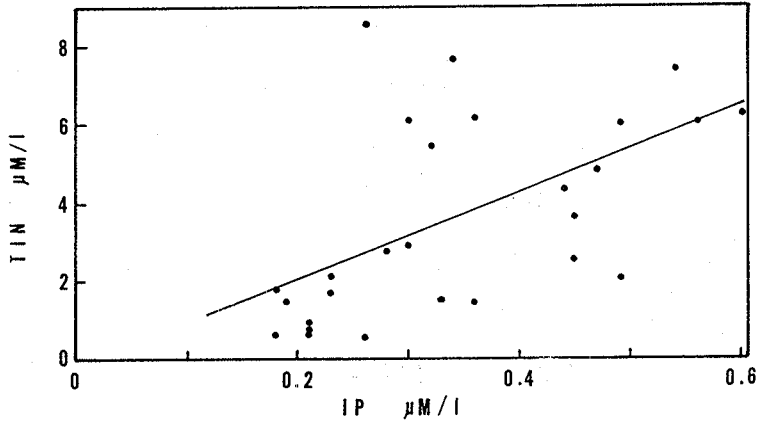


Fig. 42 Relation between total inorganic nitrogen and phosphate concentration during the summer season, 1983.

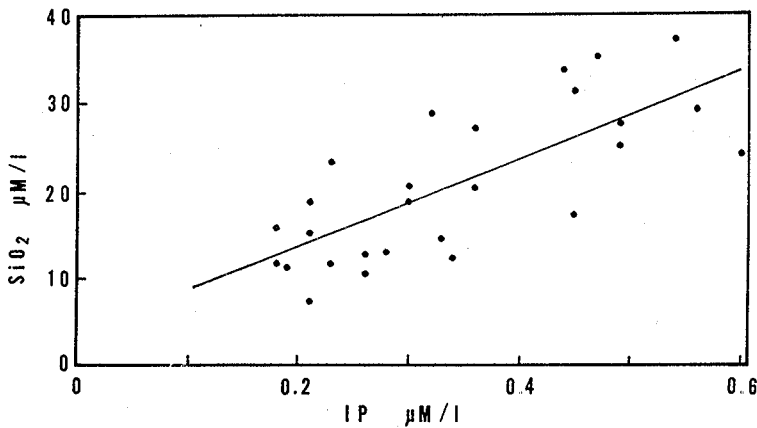


Fig. 43 Relation between silicate and phosphate concentration during the summer season, 1983.

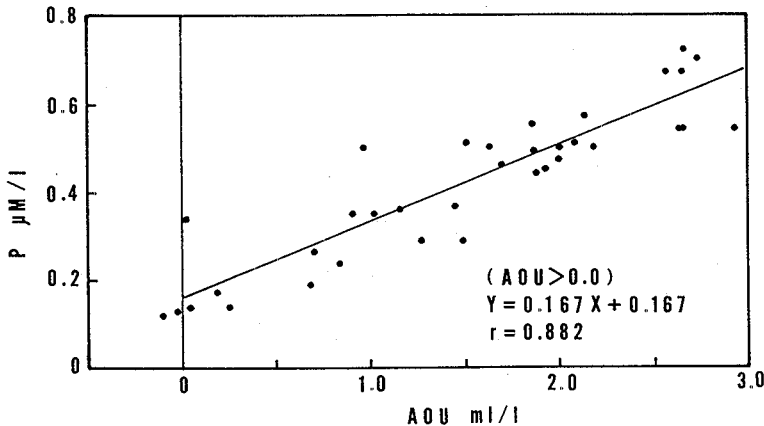


Fig 44 Relation between phosphate concentration and AOU during Summer, 1982.

4. 2 底泥中のリン酸塩組成と溶出

4. 2. 1 目的

リンの供給は陸上からの生活排水, 各種工業排水, 農地からの肥料の流入, 及び海産プランクトンの遺骸, 種々の水生動物の糞などからの再生, 海底堆積物からの溶出等による。有機態のリンや重合リン酸塩以外のオルトリン酸イオンとして海水中に溶存しているリンは植物プランクトンに吸収されたり, 鉄, アルミニウム酸化物の水加物や粘土コロイドに吸着されて海水中から除かれる。好気的な状態下にある海底堆積物中では, リンは鉄, アルミニウム, カルシウムと不溶性リン酸塩を形成して固定, 蓄積されるが, 嫌気条件下ではリン酸塩の一部は可溶性となって海水中に回帰していくことが知られている。

そこで燧灘で夏期に貧酸素水塊が形成される嫌気的な海域と対照としての好気的な海域の堆積物中のリン酸塩組成を明かにし, 貧酸素化とリン溶出の関係について検討することを目的として調査を行った。

4. 2. 2 調査及び分析方法

採泥は1988年8月に図45に示す燧灘の西部から東部海域にかけて5測点を設け, 柱状採泥器を用いて行った。無機リン酸塩組成は Chang and Jackson (1957) の方法に準拠して次のように分析して求めた。

湿泥2gを用い, 2.5%酢酸で抽出される画分をカルシウム結合態リン (Ca-P) とし, 次いで残渣を1Nフッ化アンモニウムで処理し抽出される画分をアルミニウム結合態リン (Al-P) とし, さらにこの残渣から0.1N水酸化ナトリウムで鉄結合態リン (Fe-P) を抽出した。これらの抽出液について塩酸モリブデンブルー法によりそれぞれ比色定量した。

可溶性全リン (Total Soluble Phosphorus, TSP) 及び可溶性有機態リン (Soluble Organic Phosphorus, SOP) の分析は Sommer ら (1972) の方法による。

すなわち, 湿泥2gを1N塩酸25mlで2回抽出し, 次いで0.3N水酸化ナトリウム25mlで2回の常温抽出, 更に2回の90℃抽出を行い両者を混合, 200ml定容とする。直ちにその混合液の10mlを分解フラスコに採り

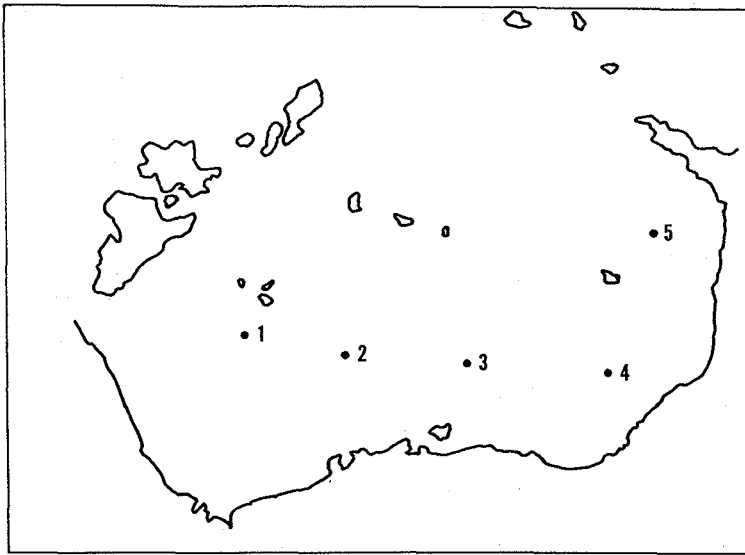


Fig. 45 Location of sampling for collecting core sediments in 1988.

濃縮後、過塩素酸10mlを加えて分解したものをTSPとして塩酸モリブデンブルー法により定量した。

先の混合液（酸性）を静置して腐植酸を沈澱させた上澄液について塩酸モリブデンブルー法で定量されるものを可溶性無機態リン（Soluble Inorganic Phosphorus, SIP）とし、TSPからSIPを差し引いたものをSOPとした。また、SIPからCa-P、Al-P及びFe-Pを差し引いたものをその他の無機態リン（Other Inorganic Phosphorus, OIP）とした。

有機炭素・窒素及びフェオ色素の分析は2.1.2.3で述べた底質分析法によった。

全硫化物はガス検知管法（日本水産資源保護協会, 1980）により分析した。

4.2.3 結 果

堆積物中の有機炭素及び窒素の分布は図46に示すように測点1から測点5にかけて順次高くなっているのが明らかである。表層泥（0～1cm）の有機炭素についてみると測点1は8.9 mg/g、測点5は17.3 mg/gとなっており、東部海域の値は西部海域のその2倍を超えている。有機窒素も炭素とはほぼ同様の傾向でC/N比は約8となっているが、東部海域でやや高い傾向が認められる。

フェオ色素についても図47のように有機炭素と同様な傾向であるが、表層泥中の含量でみると測点1は29 $\mu\text{g/g}$ であるのに対し、測点5では78 $\mu\text{g/g}$ で約2.7倍高い値を示した。有機炭素及びフェオ色素の鉛直分布についてみると、両者共に約10 cm深までは深度とともに指数関数的に減少するが、10 cm以深では測点2を除いた他はほぼ一定値となった。ただ、その減少率は有機炭素に比べてフェオ色素の方が大きい。

全硫化物は測点1と2の表層泥にはそれぞれ0.09, 0.22 mg/gが検出され、測点3, 4, 5ではそれぞれ0.30, 0.32, 0.35 mg/gが検出された。硫化物は1～2 cm深で最高値を示し、10 cm以深ではほとんど検出されなかった。

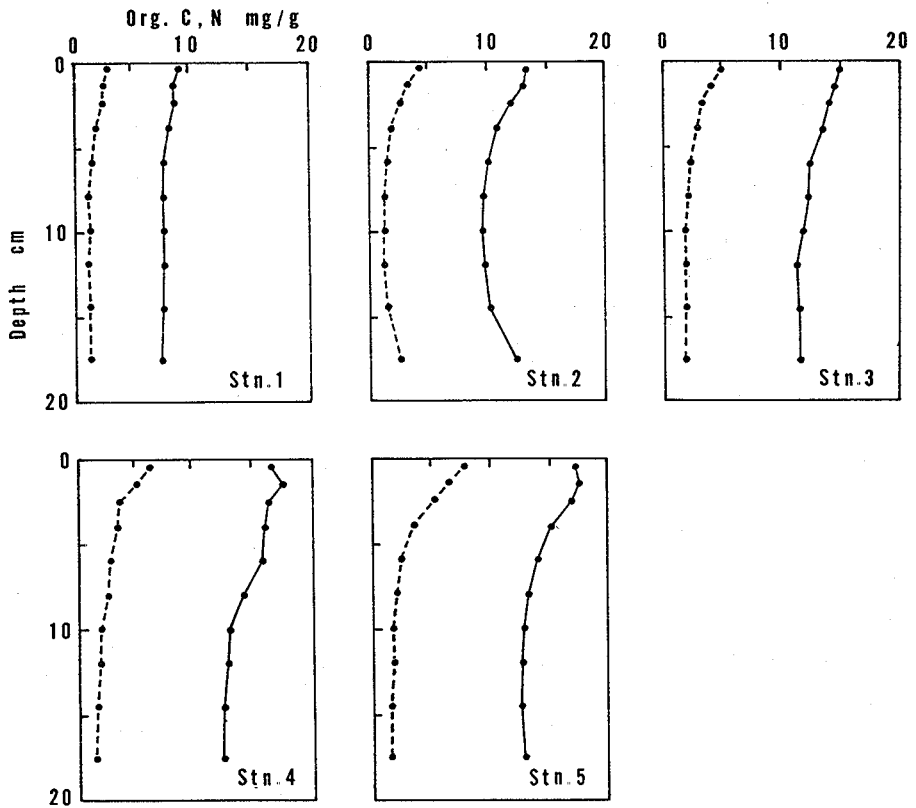


Fig. 46 Vertical profiles of organic carbon and nitrogen in sediments.

—●— Organic carbon - - - ● - - - Organic nitrogen

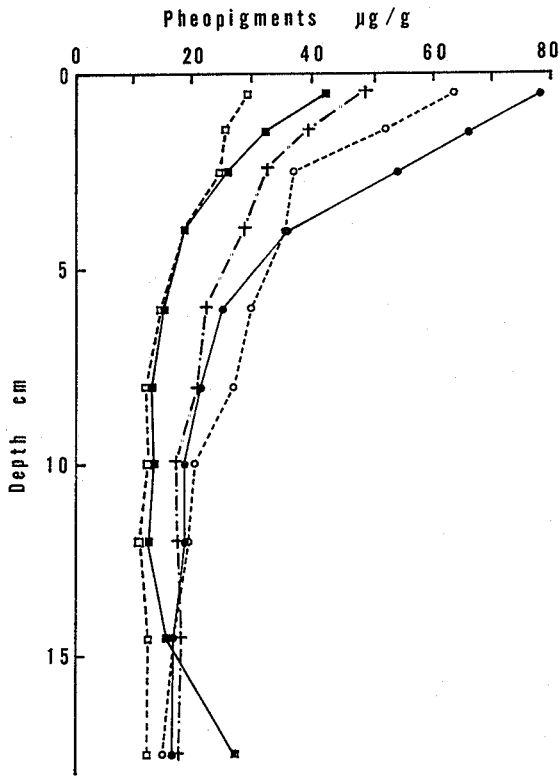


Fig 47 Vertical profiles of pheopigments in sediments.
 - - - □ Stn.1 ■ Stn.2 + - + Stn.3 ○ - - - Stn.4
 ● - - - Stn.5

堆積物中のリン酸塩組成を分析するに際して試料の乾燥によって組成が変わることが懸念されたので、まず湿泥と凍結乾燥泥について分析しその影響を調べた。その結果、乾燥によって特に Ca-P が50%も高くなることが判明したのでリンの分析には全て湿試料を用いた。

リン酸塩組成とその鉛直分布は図48にまとめて示した。表層泥中の TSP は0.53~0.59 mg/g の範囲で東部でやや高いものの有機物濃度に比べてその差は小さい。鉛直的にはいずれの測点においても深度の増加に伴って濃度低下がみられた。12 cm 深の TSP は表層のその70~82%であった。

SOP は測点1の表層で0.10 mg/g と少ないが、測点5では0.24 mg/g と多くなっており、概して東部海域で高い傾向がみられる。従って TSP に占める SOP の割合は測点1で19%、その他の測点では35~41%となり東部でその比が高くなった。なお測点1における SOP は深さ方向への減少は小さく12 cm 深までに7%しか減少しなかったが、他の測点では50~57%の減少がみられた。

SIP は測点1では0.43 mg/g であったが、その他の測点は0.35 mg/g とやや少なくほぼ一定であった。Ca-P、Al-P、Fe-P の三者の中では Ca-P が最も多く約55%を占め、次いで Al-P 27%、Fe-P 18%であった。Ca-P の鉛直分布は測点によりその様相が変わっており、測点1、2では表層から深層に向かってやや減少傾向があるが、測点4は変化がなく、測点3、5ではやや増加傾向が認められた。Al-P 及び Fe-P はほぼ同じか、わずかに減少傾向にある。Ca-P、Al-P、Fe-P の含量は概して深度による変化は少ないようである。

SIP から Ca-P、Al-P、Fe-P を除いた OIP は TSP の27~45%を占め、それは西部海域で多く、東部で少ない結果となった。測点1の OIP は0.19 mg/g で最も多く、また深度による変化が認められなかった。他の測点では OIP は深度の増加とともに減少傾向が認められた。

堆積物中のリン酸塩組成は海域によりかなり異なるものの堆積物中での鉛直方向の変化は概して少ないことから、その組成比は城(1987)が指摘しているように底層水中の DO 濃度によって規定され、また海中沈降物が海底に到達してから間もない1年以内にその場の化学環境によって決定されるものと考えられる。

4.2.4 考 察

堆積物中の有機炭素、有機窒素、フェオ色素は灘の西部から東部に向かって明かに増加しており、表層泥についてみると炭素、窒素ともに約1.9倍、フェオ色素は2.6倍高い値を示した。一方、TSP ではほとんど差は認められず、表層部で0.53~0.59 mg/g の範囲にあった。これらの値は大阪湾(城, 1983)中央部のそれに等しく、東京湾中央部(鎌谷ら, 1984)の約70%程度であった。そこで TSP に対する炭素及び窒素のモル比を求めると、C/P は43~76、N/P では4.7~7.9となり、両者とも東部海域で大きい。植物プランクトンなどに比べると堆積物中の TSP は、有機炭素や窒素に対する割合が概して低いが、特に東部海域ではリンが保持されにくく、溶脱が起こっているものと推察される。

一方 SIP は、西部海域で量的にも相対的にも多いことから、やはり好気的な環境下では難溶性リン酸塩となって蓄積されることを物語っている。ここで最も顕著な現象として好気的な堆積物中には、Ca-P、Al-P、Fe-P が多いわけではなく、それら以外の塩となっている OIP が多いのが特徴的である。東部海域では OIP が少なく、SOP が多い傾向がみられる。SIP 及び SOP の鉛直分布からみて、SIP の減少率よりも SOP の減少率の方が大きいことから、底泥中で有機態リンの分解は起こっており、そこで無機化されたリンが溶出量の大部分を占めていると考えられる。

OIP の実体については現在のところ不明であるが、堆積物を嫌気状態下に置くと減少することから、Ca-P、Al-P 及び Fe-P に比べて還元条件下でやや不安定な塩類であると思われる。城(1983)によれば、大阪湾にお

いて有機態リン含有量は堆積物中で深さ方向に変化が少なく TP が減少する下層で有機態リン組成が高くなるとしているが、今回の SOP の鉛直分布からみて分解を受けていることは明かで、堆積物からのリンの溶出は SOP の分解によるものと還元環境下での OIP の可溶化がその主要な部分を占めていると思われる。

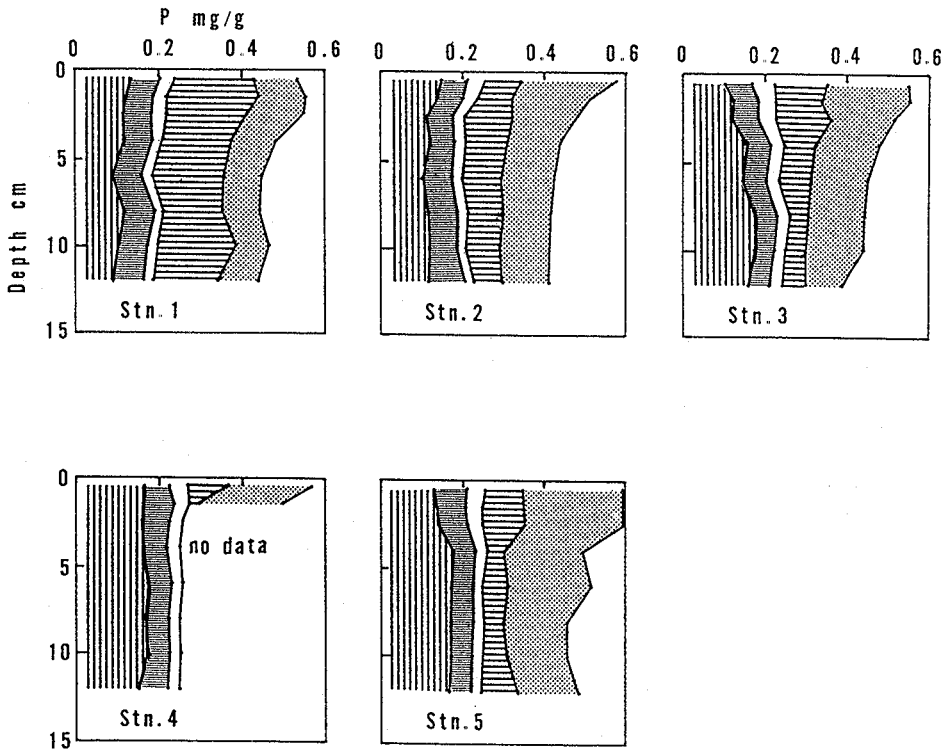


Fig. 48 Vertical distributions of fractionated phosphorus content in sediments.

▨ Ca-P ▩ Al-P □ Fe-P ▨ OIP ▤ SOP

4.3 栄養塩の循環

4.3.1 目的

ここでは燧灘東部の観測点 T 2 (図20参照) での炭素, 窒素, リンの動きをこれまでに行われている資料と新たに現場溶出量測定装置により窒素とリンの溶出速度を求めた結果を集約して考察することを目的とした。

4.3.2 方法

現場溶出量測定装置とその設置方法は 3.2.2 に示した。

4.3.3 結果

- 1) POC, PON, 懸濁態リン (PP) 及びクロロフィル a の現存量

1980年に3定点で5月から8月にかけて7回行った調査結果から有光層中(0, 5, 10, 15m)の平均濃度を求めたところ POC 331 $\mu\text{g}/\text{l}$, PON 42 $\mu\text{g}/\text{g}$, PP 7.0 $\mu\text{g}/\text{g}$, クロロフィルa 1.89 $\mu\text{g}/\text{g}$ が得られた。これらの成分間の一次回帰式を求めた結果は以下の通りである。

$$\text{POC} = 56.1 (\text{Chl}a) + 225 \quad (r = 0.711 \quad n = 84)$$

$$\text{PON} = 7.98 (\text{Chl}a) + 27.1 \quad (r = 0.714 \quad n = 83)$$

$$\text{PP} = 0.953 (\text{Chl}a) + 5.24 \quad (r = 0.705 \quad n = 84)$$

これらの式の直線の勾配から単位クロロフィルa 当りの POC : PON : PP のモル比を試算してみると 152 : 18.5 : 1 となり炭素, 窒素の比は Redfield 比より大きい結果となった。

また, Y切片から懸濁物の中でクロロフィルa を含まないデトライタス様物質の POC, PON, PP を仮定し, これらのモル比を求めると 111 : 11.5 : 1 となり, これについても炭素は Redfield 比より大きい値となった。この区分のリンには粘土粒子や有機物に吸着されたものや難溶性無機リン酸塩が含まれているにもかかわらず, 炭素に比べてリンが少ない理由についてはさらに検討の必要がある。

2) 沈降物

堆積物表層への懸濁物の輸送については海底上7mに設置したセジメントトラップによる沈降物の測定によって行われた。その結果は表11に示したように全質量の鉛直流束は2.70~21.10 g/m²/dayの範囲で測定され, 時期による変動が大であった。本海域の底層水は非常に濁っているので, その高濁度層の厚さの変動により, トラップがその中に入った可能性が考えられるが, 特定できなかったので平均値を採用することにした。その結果, 全質量の流束は8.18 g/m²/day, 有機炭素及び有機窒素のそれはそれぞれ308, 33.5 mg/m²/day, そして全リンのそれは6.71 mg/m²/day となった。なお, 全リンの約36%が有機態リンであった。

今, 全リンに対する POC, PON のモル比を求めるとそれぞれ108, 11となるが有機態リンに対するそれは331及び30となることより, この際捕集された沈降物はかなり分解が進んでいる物質と考えられる。

沖合部の測点T2における沈降物量から次に示す Matsumoto (1975) の式により堆積速度を計算した。

$$W = S(1 - \phi) / P_s$$

W : 粒子の堆積速度 (g/cm²/yr)

S : 堆積速度 (cm/yr)

ϕ : 表層の間隙率

P_s : 堆積物粒子の真比重 (g/cm³)

堆積物表層の水分は平均69%と高く, 真比重が2.3であることより, 間隙率は0.83となる。その結果, 堆積速度は0.76 cm/yr となった。ただ, 堆積物は年月の経過とともに圧密され, その厚さが減じるため平均堆積速度はこの値より小さくなる。松本, 横田 (1980) が香川県豊浜町沖の堆積物について²¹⁰Pb 法によって測定した堆積速度0.33 cm/yr に比べてかなり大きい, 松本が測定した場所は水深20m程度であること, 及び測点T2は本海域では比較的深く(約25m) 諸々の物質の沈降集積域となっていることから直接比較できないと思われる。一方, 田辺ら (1984) が測点T2において polychlorinated biphenyls (PCB) をトレーサーにして求めた堆積速度は0.67 cm/yr であった。

Table 11 Mass flux and its chemical composition (Stn T2)

Observation Date	Mass flux g/m ² /day	Org C mg/g	Org N mg/g	Org P mg/g	TP mg/g	Org C mg/m ² /day	Org N mg/m ² /day	Org P mg/m ² /day	TP mg/m ² /day
1982, Jul 12	6.57	46.9	5.33	0.39	0.90	308	35.0	2.57	5.89
Jul 26	21.10	27.3	2.84	0.26	0.71	575	60.0	5.40	14.90
Aug 9	9.75	41.0	4.41	0.35	0.79	400	43.0	3.41	7.75
Aug 23	6.65	38.2	4.66	0.37	0.84	254	31.0	2.48	5.58
Sep 6	4.50	47.6	4.22	0.35	1.03	214	19.0	1.58	4.65
1983, Jun 8	6.37	36.5	3.80		0.62	233	24.2		3.97
Jun 24	18.81	25.3	2.90		0.63	476	54.5		11.77
Jul 16	14.40	23.3	3.00		0.47	336	43.2		6.78
Jul 28	5.97	25.7	2.20		0.44	153	13.1		2.61
Aug 27	12.90	50.2	4.60		0.86	648	59.3		11.12
1984, Jun 25	4.00	45.0	5.25	0.35	1.16	180	21.0	1.40	4.65
Jul 27	2.90	45.5	5.17	0.32	0.93	132	15.0	0.93	2.70
Aug 23	6.20	46.5	4.68	0.47	0.95	288	29.0	2.90	5.89
1985, May 28	2.90	69.7	7.31	0.36	1.72	202	21.2	1.04	4.99
Jun 19	10.30	40.7	4.83		1.04	419	49.7		10.71
Jul 29	3.40	76.0	7.67		1.41	258	26.1		4.79
Aug 21	2.70	68.0	8.16	0.37	1.17	184	22.0	1.00	3.16
Oct 31	7.80	36.2	4.66	0.33	1.14	282	36.3	2.57	8.89
Average (STD)	8.18 (5.29)	43.9 (14.7)	4.76 (1.59)	0.36 (0.05)	0.93 (0.31)	308 (141)	33.5 (14.6)	2.30 (1.27)	6.71 (3.37)

3) 堆積物中からの有機炭素・窒素, リンの溶出

測点 T 2 における堆積物中の有機炭素と有機窒素の鉛直分布を図49に示した。両者とも深さ約 8 cm ではほぼ一定値となった。これは浅いところの堆積物中の有機物が比較的分解しやすいことを意味し、8 cm 以深では分解反応が非常に遅くなるものと考えられる。そこで表層部における有機物の分解速度を堆積環境が定常状態にあると仮定し、堆積物表面及び交点における有機炭素濃度を求めると、それぞれ 18.3, 13.0 mg/g となった。そして堆積物表面への堆積速度は、前述のように沈降物捕集実験により 0.296 g/cm²/yr が求められているから、次式 (Montani *et al*, 1980) により分解速度を見積った。

$$M_i = (C_o - C_z) \times W$$

M_i : 成分の分解速度 (mg/cm²/yr)

W : 粒子の堆積速度 (g/cm²/yr)

C_o : 堆積物表層での成分濃度 (mg/g)

C_z : 交点での成分濃度 (mg/g)

その結果、有機炭素の分解速度は 1.52 mg/cm²/yr となり、同様に有機窒素のそれは 0.182 mg/cm²/yr となった。可溶性全リン及び有機態リンの鉛直分布を図50に示した。先と同様の手法で有機態リンの分解速度を求めると 0.032 mg/cm²/yr となり、可溶性全リンについてはリンの溶出速度として求めたところ 0.039 mg/cm²/yr となった。

したがって堆積物から水中に回帰するリンの約82%が有機態リンの分解によるものであり、難溶性のリン酸塩からの溶出は相対的には少ないと考えられた。

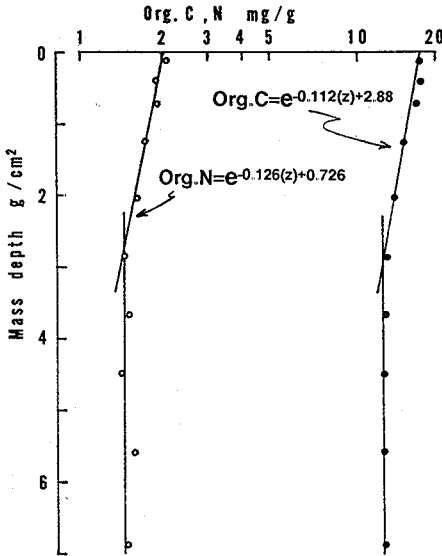


Fig 49 Vertical distributions of organic carbon, nitrogen and their minerarization rate at Station T2.

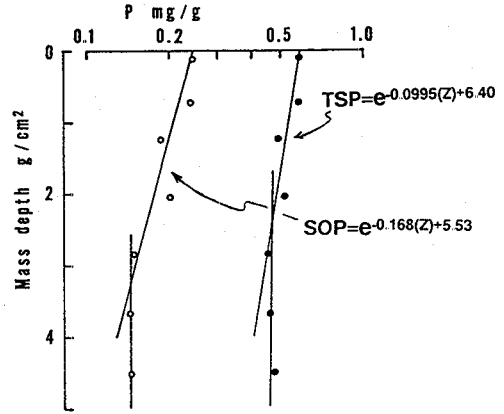


Fig 50 Vertical distributions of phosphorus and their release rate at Station T2.

4) ベルジャー型密閉容器による栄養塩の現場溶出量の測定

測点T2において容器内のDO、無機態リン、無機態窒素の経時変化から、DO消費速度、栄養塩溶出速度を見積り、表12に示した。4回の調査のうち、84年11月の結果は異常に大きいので除外して平均値を求めるとDO消費速度は610 mg/m²/day、リンの溶出速度16 mg/m²/day、窒素の溶出速度43 mg/m²/dayが得られた。これをもとにP:N:Oのモル比を求めると1:6.0:74となり、リンや窒素の溶出量に対して酸素の消費量が著しく少ない結果となった。

Table 12 Release rate of nutrient from sediment by incubator

Date	Incubation time hr	DO consump. mg/m ² /day	IP mg/m ² /day	TIN mg/m ² /day
1984, Aug 23	7.4	660	9.9	no data
Nov 17	4.0	1920	29.1	133.0
1985, Jul 29	4.5	600	13.9	50.2
Aug 21	2.8	570	25.0	34.7
Average		610	16.3	42.5

4.3.4 考 察

釜灘東部の夏期の底層水が貧酸素化する海域で、1979年から88年にかけて、水質分析、沈降物の捕集、堆積物分析、海底からの栄養塩の溶出速度の実測等の調査分析を行った結果を主として栄養塩の循環の立場から取りまとめた。その結果を図51に示した。

先ず海底への物質輸送としての沈降物の鉛直流束は全質量で8.18 g/m²/day がえられた。この値はやや大きいと思われるが、これをもとに有機炭素、有機窒素及びリンの鉛直流束を求めるとそれぞれ308, 33.5, 6.71 mg/m²/day と見積られた。相対的にリンの流束が大きいことが明かであるが、これは好氣的な条件下ではリンが種々の粒子に吸着され易いことや難溶性リン酸塩を形成するためと思われる。東部海域の基礎生産量は半田ら

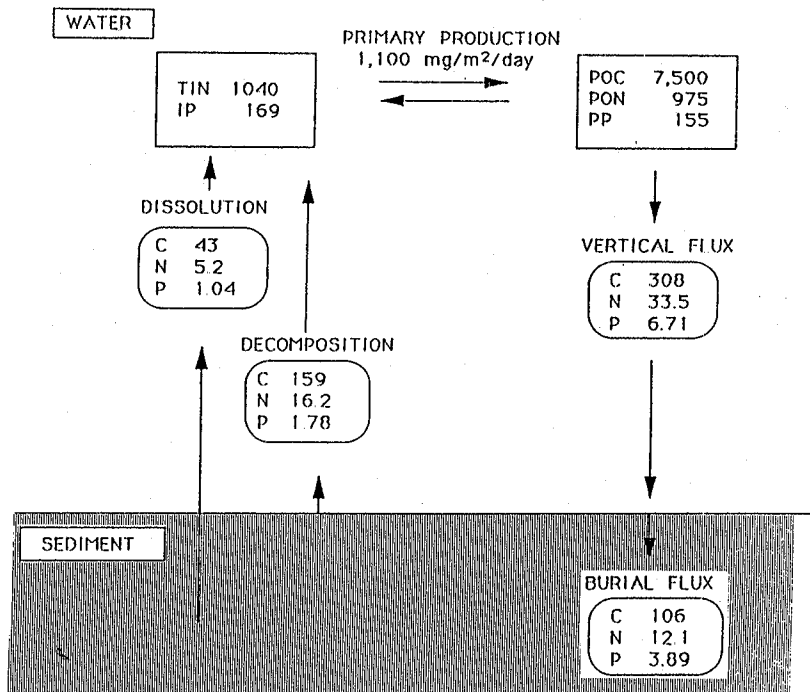


Fig. 51 Carbon, nitrogen and phosphorus flow through sea water and sediment at Station T2.

(1984)によれば $1.1 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ であることから、有機炭素の鉛直流束は基礎生産の28%に相当する。また、観測点の水深を25mとし、懸濁態の有機炭素、有機窒素及びリンの平均現存量を見ると、それぞれ7.5, 1.0, 0.16 g/m^2 となる。これから毎日、沈降によって海中から底泥表面に運ばれる炭素、窒素及びリンは海中懸濁物の現存量に対してそれぞれ C 4.1%, N 3.4%, P 4.2%となった。また、全質量の流束から本海域の表層の堆積速度を求めると 0.76 cm/yr となった。

柱状堆積物試料の分析結果から、堆積物から海中に回帰する炭素、窒素、リンはそれぞれ43, 5.2, 1.04 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ となった。そして堆積物中に埋没して物質循環系から離脱する量はC 106, N 12.1, P 3.89 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ と見積られ、リンが固定される率が高いことが明かである。沈降物が完全に堆積物となる過程、すなわち新生堆積物となるまでに有機炭素の約52%, 有機窒素の約48%が分解、再生され溶出して行くが、リンは約27%しか再生、溶出されない。

このような結果に対して、1983年、84年の8月にベルジャー型の容器を海底に沈めて窒素とリンの溶出量を測定した結果は、それぞれ43及び16 $\text{mg/m}^2/\text{day}$ となり、これを上述の堆積物の化学分析から求めた値と比較すると窒素の溶出量は約7倍、リンでは約15倍となった。これらの値は高水温時の測定結果であるため、塩沢ら(1984)も指摘しているように、夏季の溶出量をもって年間の平均値を論ずることはできないが、夏にはリンの溶出量が窒素に比べて相対的に大きくなっていることは明らかである。これは夏季の赤潮発生などに重要な意味を有しており、高水温時には底層水中のDOが減少し、底泥が強い還元状態になると、それまで堆積物中に固定、蓄積されていたリンが可溶化して海水中に出てくることを示している。周年を通してみるとリンの溶出量は炭素、窒素に比べて少ないが、高水温時にかなり集中的に多量に溶出しており、これが夏季のリン補給源となり、ひいては赤潮の発生と結びつくように思われる。1982年当時の燧灘への窒素、リンの流入負荷はそれぞれ12,600及び1,420 ton/yr と見積られているので(中西, 浮田, 1990)、海域によって直接の負荷量が異なるのは当然であるが、仮にそれらが燧灘一帯に均等に分配されたとすると単位面積当りの窒素及びリンの負荷量はそれぞれ8.92及び1.01 $\text{ton/Km}^2/\text{yr}$ となる。それに対して、安定な形で堆積物中に埋没する窒素、リンはそれぞれ4.42及び1.42 $\text{ton/Km}^2/\text{yr}$ に相当する。従って燧灘東部の水深25m程度の海域では、陸域からの窒素の流入負荷の50%が堆積物中に埋没し、同様にリンについては141%が埋没固定されることになり、相対的にリンの除去量が大きいことが明らかであり、またこの計算値は東部海域が燧灘へ負荷されるリンの堆積域となっていることを示していると考えられる。一方、堆積物からの溶出量は4.3.3で述べたように窒素が7.74, リン 1.04 $\text{ton/Km}^2/\text{yr}$ と計算されているから、流入負荷に対する溶出量の割合は窒素87%, リン103%となる。堆積物中に埋没して行く量と、溶出量の合量が陸からの負荷量を大きく上回るが、これは上述のように相当量の窒素やリンが懸濁態の形で東部の深い海域に運ばれていることと、窒素やリンの一部が繰り返し植物プランクトンに利用されているためと推察される。

燧灘全域で水揚げされる漁獲物によるリンの回収量は150 ton と見積られたので(5.4参照)、これを単位面積当りに計算すると106 $\text{kg/Km}^2/\text{yr}$ となり、これは陸域からのリン負荷量の10.5%に相当する。

4.4 要 約

閉鎖性の強い富栄養化海域である燧灘東部海域において、主として海水中の窒素、リンの現存量の季節変化、堆積、再生について検討した。栄養塩類の現存量は季節的には成層期に多く、循環期に少ない傾向が認められた。その主要な原因は成層期の底層水中に栄養塩類が高濃度に蓄積されるからである。そのために栄養塩の循環がうまく回轉せず、夏期の生物生産が他の富栄養化海域に比べて低く抑えられる一因となっている。

燧灘の中で温度躍層が形成されない海域と形成される海域の堆積物中のリン濃度を比較した結果、安定な成層が形成され貧酸素化する海域では堆積物中のリンが相対的に少ないことが明らかになると共に、底泥中のカルシウム、アルミニウム、鉄以外の金属と結合している無機態リン画分が減少することも判明した。

東部海域の有機窒素及びリンの鉛直流束はそれぞれ33.5, 6.71 mg/m²/day と見積られたが、その内、窒素は63%がやがて海水中に回帰してくるが、リンは42%しか回帰しない。更にそのリンの海水中への回帰は主として高水温時の貧酸素状態下で起こっていると推察された。

第5章 水産生物相の変遷

5.1 目的

燧灘東部海域で環境汚染が表面化し、沿岸住民に広く知られ、社会問題となったのは、1970年8月に台風によって海水が攪拌され、それまで海底に蓄積されていた有機汚泥が巻き上げられて、天然魚や養殖魚が大量に斃死してからである。その後続いて大規模赤潮及び貧酸素水塊の出現によって継続して漁業被害が生じたが、1960年以降に生じた環境変化がどのような形で水産生物に影響を与えたかを知る目的で漁獲統計資料調査を行うことにした。

これまで、この海域での汚染が漁業に及ぼした影響についてはほとんど検討されていないので、漁獲統計に実際、どの様に表れているのかを検討し、環境汚染の影響を調べると共にその結果に基づいて今後のこの海域の漁業開発の方向を探ることにした。

5.2 調査方法

燧灘の漁獲統計は1977年までは備後灘と芸予水道を含めた形で集計されてきたために、本論文で調査海域としている燧灘とは異なっている。また、多数の島々を含む備後灘、芸予水道に比べて島をほとんど持たない平坦な海底地形の燧灘では漁獲される魚種に大きな差異がみられる。

そこで、ここでは燧灘でも特に富栄養化の進行と有機汚染を受けた東部海域の水産生物相の変遷をみるために、東部海域を主漁場とし、漁獲高が多く、古い資料が保存されていた香川県の仁尾、観音寺、伊吹島、豊浜の各漁業協同組合の漁獲の変遷をみることにした。4漁協の漁獲量は燧灘に面する香川県の総漁獲量の96.8%（1982～87年の平均）を占めており、4漁協とその他の漁協の間には漁獲物内容に若干の違いはあるものの、燧灘東部海域の姿を十分に代表しているといえよう。

実際の資料は1957年以降のもので中四国農政局香川統計事務所三豊出張所に提供して頂いた。その他、既に公表されている中四国農林水産統計年報（1958-85）も利用した。

5.3 結果

まず本海域における4漁協の平均延出漁日数（1982-87）は図52に示すように、エビ漕網（小型底引網）によるもの27.6%、その他の刺網18.2%、ます網13.0%、戦車漕12.8%、釣9.4%、パッチ網5.0%と続いている。

また漁獲方法では図53のようにパッチ網による漁獲が全漁獲の実に89.7%を占めており、これが本海域の最も特徴的な漁業形態である。漁業経営体の最も多いエビ漕網の漁獲は3.3%に過ぎない。

養殖海苔を除く総漁獲量は図54に示すように1957年の7,400 ton から65年の4,300 ton へとやや減少傾向にあったが、その後、乱上下しながらも79年には20,500 ton と約4倍の伸びを示し、それ以降はほぼ横ばい状態にある。総漁獲高に占めるカタクチワシの割合は1957～65年の間の平均で58%であったが、1979～87年のそれは81%に達している。

カタクチワシ以外の魚類は図55に示すように1957年から69年にかけて減少傾向にあったが、70年から4年間だけ漁獲が増加した。その後77年まで減少し、以後増減が著しいものの、魚種によっては大幅な伸びを示しているものがある。

高価格魚の代表種であるマダイは図56に示すように1961年に最高の61.5 ton を記録したがその後徐々に減少し66年から82年まで低迷を続けた。83年頃から回復の兆しが見られるようである。

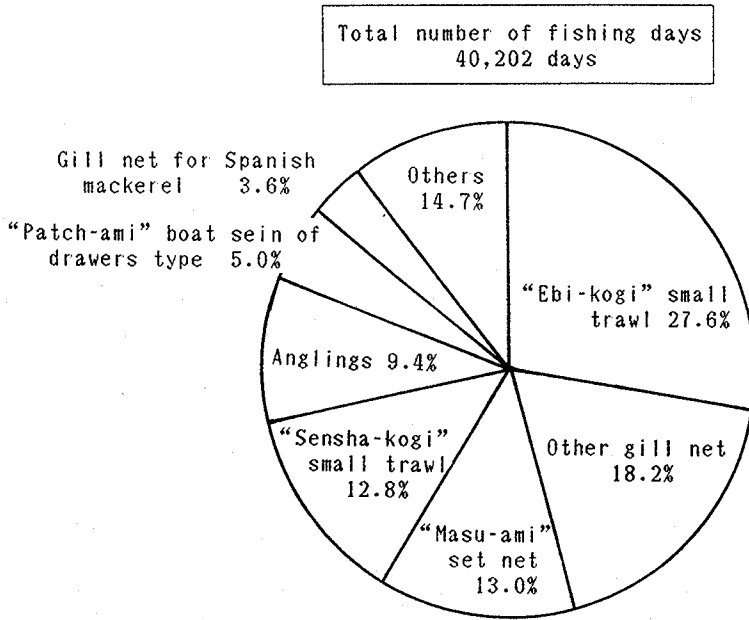


Fig. 52 Average number of fishing days by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada

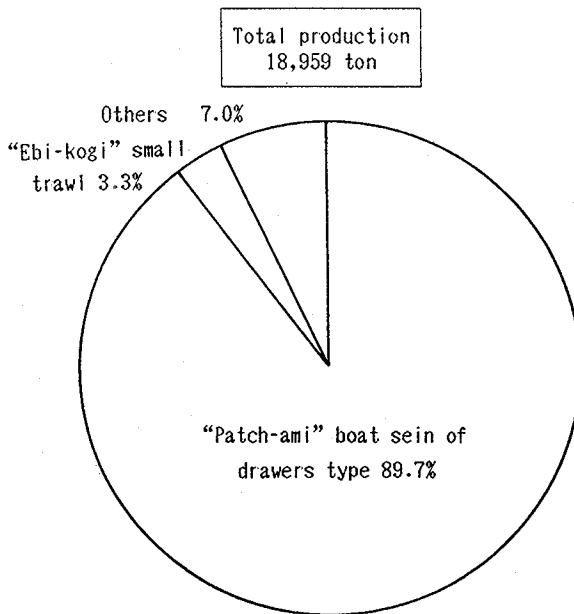


Fig. 53 Average production of fisheries by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada

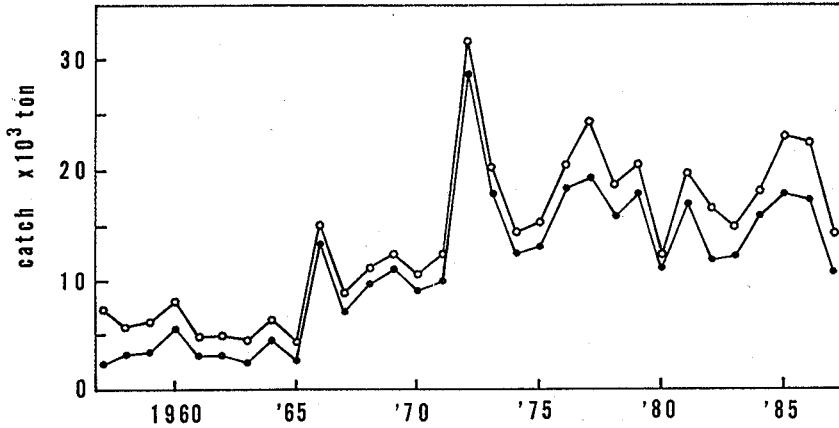


Fig. 54 Annual changes in catch of the total and anchovy by four fishery co-operatives in Eastern Hiuchi Nada.
 ○ Total fish catch ● Catch of anchovy

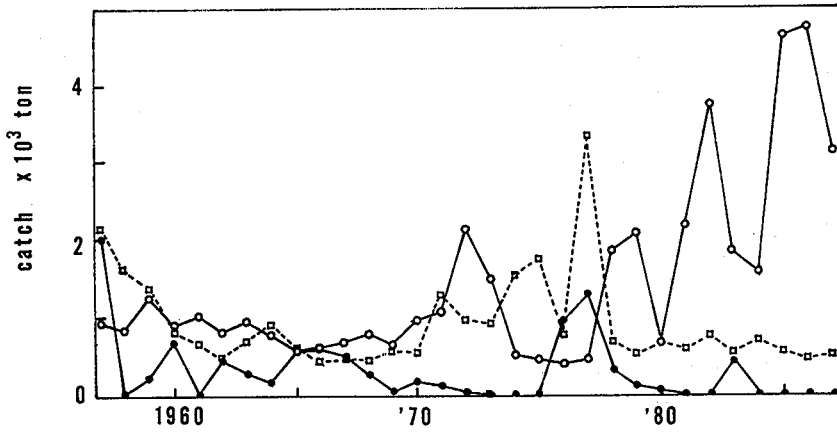


Fig. 55 Annual changes in catch of fishes by four fishery co-operatives in Eastern Hiuchi Nada.
 ○ Fishes except anchovy ● Shellfishes ◻ Marine invertebrate except shellfishes

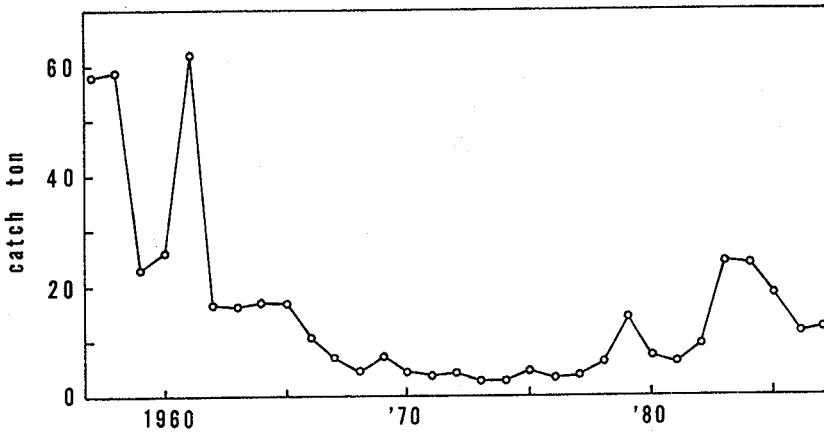


Fig. 56 Annual change in catch of red sea bream by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada

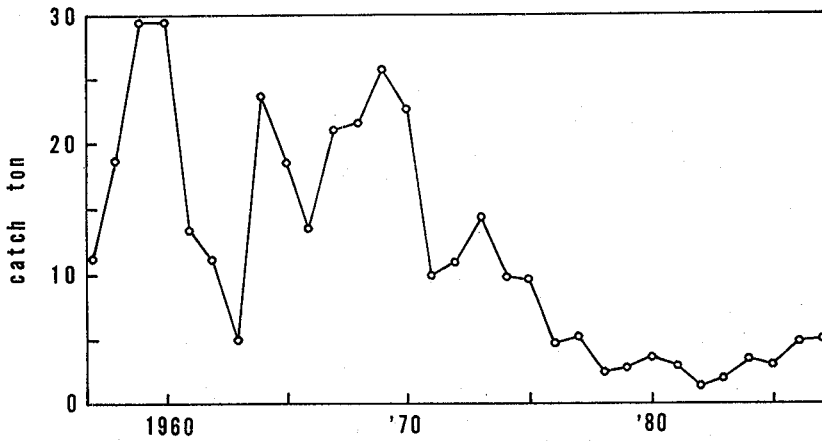


Fig. 57 Annual change in catch of "Kuruma" prawn by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada

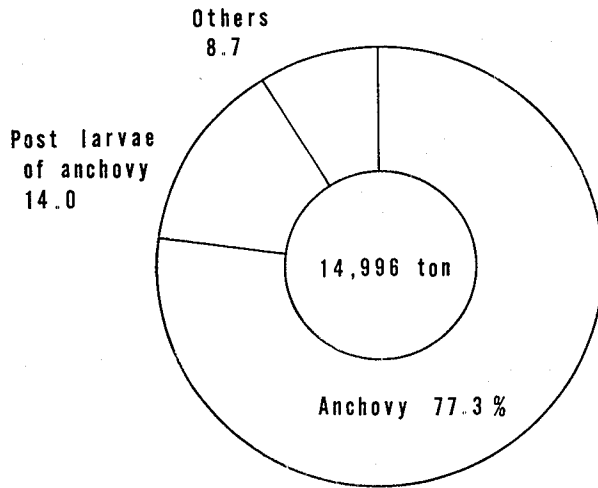


Fig 58 Average species composition of catches in weight in Eastern Hiuchi Nada from 1982 to 1987.

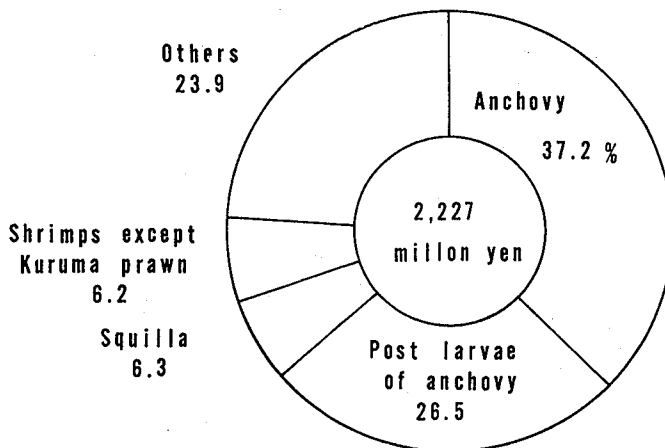


Fig 59 Average species composition of catches in value in Eastern Hiuchi Nada from 1982 to 1987.

クルマエビの漁獲量は図57に示すように1959, 60年に最高で29.4 tonであったが70年を境に急激に減少の一途をたどっていた。そして82年には最低の1.3 tonを記録したが、それ以後には徐々に増加の傾向がみられ、87年には5.0 tonが水揚げされた。

外海から入り込む魚種であるサワラは1960年に最低1.1 tonで、それからほぼ横ばい状態が77年まで続いた。ところが78年から急激な漁獲の伸びがあり、85年には実に106.7 tonを記録し、87年は57.3 tonとなった。ヒラメについても80年から急増し、87年には11.7 tonと約10倍となった。

これらの他、クルマエビ以外のエビ類、タコ類、カレイ類、クロダイ、メバル等ほとんどの魚種が年代に若干のズレがあるものの減少し、1980年頃から徐々に回復し始めているように思われる。トリ貝とアカ貝は県の特別採捕許可を得て漁獲されており、生息密度の年変動が大きい。貝類は統計資料が不完全で漁獲の実態は明かでない。1974年にはトリ貝の大量斃死、さらに1978年にはアカ貝の大量斃死が記録されている。最近では観音寺漁協で1982年にトリ貝9.4 ton、アカ貝2.8 tonが水揚げされている。

漁場汚染が回復に向かっていると思われた1982年から87年の平均漁獲量は図58と59に示すように総計14,996 tonで、その内の77.3%に当たる11,592 tonがカタクチイワシ、14.0%の2,092 tonがシラスであり、いずれもパッチ網漁法によって獲られたものである。次いで漁獲の多いものはシャコ類1.68%、クルマエビ以外のエビ類1.14%、トリガイ0.44%、サワラ0.41%、マダイ0.09%、クルマエビ0.018%となっている。

同様に漁獲高を金額でみると総計2,227百万円でカタクチイワシ37.2%、シラス26.5%となっている。次いでシャコ類6.25%、クルマエビ以外のエビ類6.18%、サワラ類3.00%、マダイ1.70%、カレイ類1.66%、クロダイ1.28%となっている。

わが国の養殖海苔の生産は1960年代後半に人工採苗技術の普及や網ひびの導入等の技術的な進歩と共に、沿岸水域の富栄養化により、生産量が急速に伸びている。燧灘東部海域では図60に示すように1973年にピークに達し板海苔27百万枚を生産した。その後徐々に減少し、1985~89年の平均生産高は約10.5百万枚となった。

1982年から1987年にかけての燧灘沿岸全域における養殖海苔の年平均生産高は233.6百万枚であり、その内香川県側で生産されたものは14.2百万枚であった。従って、燧灘東部の4漁協の生産高は燧灘全体の6%程度であるが、生産高の推移は燧灘全域のそれとよく似た傾向を示した。

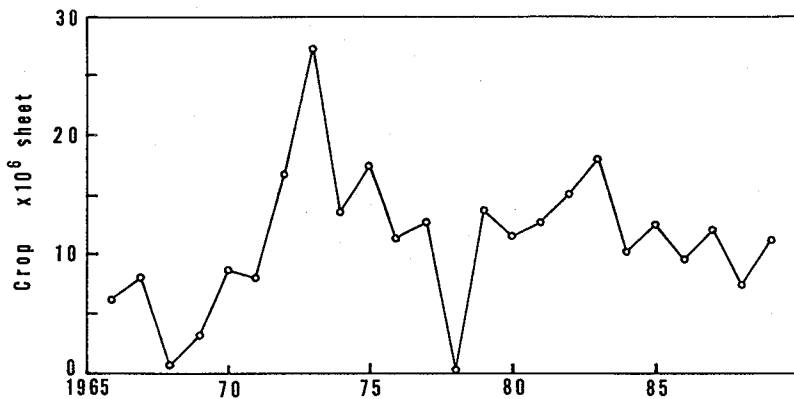


Fig. 60 Annual change in the culture production of "Nori" laver by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada.

5. 4 考 察

燧灘東部海域の漁獲量の変遷を本海域を主漁場とする4漁協の資料に基づいて1957年から追った。その結果、1965年までは約5,800 tonであったものが、1979年までに約4倍の20,500 tonに増加した。多々良(1982)は瀬戸内海における漁獲量の推移について3つの時期に分けて解説している。すなわち、1962年までを富栄養化以前、1969年までの増加期を富栄養化時代前期、1975年までを富栄養化時代後期としている。また、1965年まではカタクチワシが総漁獲に占める割合は約58%であったが、1979年~87年には81%に達しており、総漁獲の伸びはカタクチワシの伸びによるものである。丁度、多々良が指摘した富栄養化時代後期以降にカタクチワシの漁獲量が増加しており、瀬戸内海全域と同じように海域の富栄養化の影響が漁業生産に一部現れたとみることができる。4漁協でカタクチワシ漁に使用される漁船は1965年以来24統であるが、漁法と漁船動力に大きな変革があった。1956年迄はキンチャク網によっていたが、その後パッチ網に変わり、1965年頃には漁船動力が焼玉エンジンからジーゼルエンジンに切り換えられた。更に当海域では漁獲から加工までの時間短縮により高品位の煮干を生産することに努力し、高収入を確保することができた。そのためカタクチワシに対する漁獲圧が高まったことが大きな要因であると考えられる。

本海域における代表的な漁業形態である小型底引網は1970年以降それまでの2/3に削減されたが、それによる漁獲量は横ばい状態にある。1960年~75年の間は急激な海の富栄養化、貧酸素水塊の形成、農薬汚染などが相乗的に作用して水産生物の生息環境が悪化し、漁獲される魚種の変化や資源の減少が起こったものと推察される。1985年以降、クルマエビ、マダイ、クロダイ、ヒラメ等が増加しており、魚類の生息環境が改善されてきた一面もあるが、後に述べるように人工孵化によって生産された稚魚の放流効果によるところが大であると考えられる。高価格魚の代表であるマダイやクルマエビは1965~70年頃から急激に減少したが、1980年代に入ってから徐々に回復の兆候がみられるようになっている。またヒラメ、サワラの漁獲の伸びが著しい。

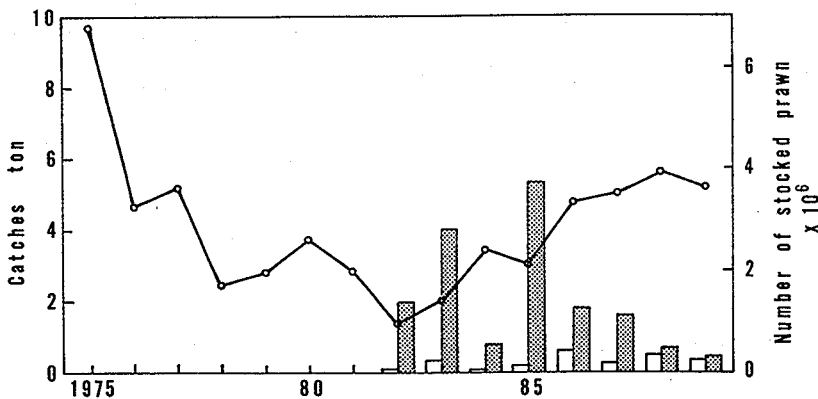


Fig. 61 Annual Changes in catch and the stocking of "Kuruma" prawn by four fisheries co-operatives in Eastern Hiuchi Nada
 □ Large seed ▨ Small seed

東部海域におけるクルマエビの放流は1982年から実施されており、その後図61に示すように徐々に漁獲高が増加している。当初は10~30 mm 程度の小型種苗を翌年捕獲する目的で8月下旬から9月上旬に数百万匹単位を放流していたが、他の魚類による食害が大きいため放流尾数が多い割には効果が少なかった。最近では50 mm 以上の大型種苗を6~7月頃放流し、その年内に収獲するようになっている。近年捕獲されるエビのサイズから、それが天然群か放流群かの区別がある程度つくようになり、漁獲物の中に放流群が確認されることから放流が資源の再生産にも貢献していることが明らかになっている。

燧灘東部の干潟域に放流されたクルマエビの稚エビは時期により変化があるものの放流後3カ月くらいまでは浅い放流地点からの移動はそれほど大きくはないが、水温の低下とともに沖合に分散して越冬する。体長120 mm を超える大型のものは陸岸沿いに南下し、それから愛媛県の沿岸を西進した後沖合の砂地に移動する。また成層期に貧酸素化する20m以深の海溝部分は横断することができないらしく、反時計回りの潮汐残渣流に逆らって南下することが大林(1987)によって明かにされている。

養殖海苔の生産は1970年頃に急激な生産の伸びが見られ、1973年に最高値(27万枚)を記録しその後徐々に減少している。海苔は1968-69年に支柱式養殖より浮き流し式養殖に転換され生産量も飛躍的に増加した。しかし、1975年頃より色落ち現象が見られるようになり栽培期間が短くなってきた。それとともなって着業者数及び網ひび棚数がそれぞれ1/20と1/5に減少し、生産量も板海苔換算で12万枚程度にまで減少した。これは1973年より尿尿の海上投棄の廃止、化学肥料工場の製造品目の変換等によって富栄養化の進行が抑えられたこと、流れが遅いこと及び網ひび棚数が過剰であったことによるものと思われる。

濾過食性種であるカタクチイワシや養殖海苔の生産の伸びとは逆に肉食性魚類や甲殻類は貧酸素水の出現によって資源生産が阻害され、過度の一次生産が二次生産につながらなかったといえる。なお、甲殻類には陸上からの農薬の流入による影響もあったように思われるが、確証は得られなかった。

燧灘全域の漁獲を1982~87年について平均すると総漁獲は46,065 ton あり、そのうちカタクチイワシが29,408 ton (63.8%), シラスが4,178 ton (9.1%) を占めている。本海域ではカタクチイワシから良質の煮干を生産しており、富栄養化によってもたらされた資源を良く利用しており、この海域の漁業経営を支えてきたと考えられた。

本海域の一次生産と漁業生産の割合について試算してみると、燧灘の同時期の一次生産量は半田ら(1984)によれば $1\text{gC}/\text{m}^2/\text{day}$ と見積られていることから、灘全体では $5.16 \times 10^5 \text{ ton/yr}$ となる。これは植物プランクトン湿重量として $5.19 \times 10^6 \text{ ton}$ に相当することより、カタクチイワシの漁獲量及び総漁獲は一次生産量のそれぞれ0.57%, 0.89%となり、大阪湾の0.52%(門谷, 三島, 岡市, 1991)に比べてきわめて高いと考えられる。

漁獲を海域の窒素、リンの回収という見地から検討した。食品成分表(小原ら, 1975)によれば煮干は水分16.5%, 窒素11.1%(蛋白質69.5%), リン1.5%であるから、生のカタクチイワシの水分を75%としてその漁獲量(29,408 ton)から窒素及びリン量を求めるとそれぞれ720 ton 及び97 ton となる。一方、1982年度における燧灘への窒素及びリンの年間流入負荷量はそれぞれ12,600 ton 及び1,420 ton が求められているので(中西, 浮田, 1990)、窒素はその5.7%, リンは6.8%となる。総漁獲物(46,065 ton)についてその組成をカタクチイワシを代表として計算すると、回収される窒素は1,100 ton, リンは150 ton となり、流入負荷のそれぞれ8.7%, 10.6%に相当する。本海域においては漁獲による栄養塩の回収率が大阪湾や播磨灘の約3%(岡市, 門谷, 1990)に比べて3倍高い結果となった。これは栄養段階の低い魚の漁獲によるためと考えられ、富栄養化の状況に適応した漁業が行われていると言えよう。

燧灘における漁業は現在、パッチ網によるカタクチイワシの漁獲と小型底引網によるシャコ、エビ類の漁獲が

主である。将来においてもその形態は継続されるものと思われる。カタクチイワシ漁については漁獲量の急激な落込みは無いものと考えられるが、その他の漁獲については資源の枯渇が心配される。燧灘はそのほとんどが平坦な海底地形をしており、底質は泥または砂泥である。魚類の産卵や稚魚の生息場所に適した磯、藻場及び干潟はかぎられている。そのため漁業資源の培養と保護育成が必要である。具体例として藻場の造成、稚魚稚貝の放流とその保護水域の設定、計画漁業が望まれる。

5.5 要 約

東部海域の総漁獲は1966年から79年にかけて4倍の伸びをみせたものの、その実体はカタクチイワシ及びシラスの多獲であり、これが総漁獲の実に81%を占めるに至っている。マダイやクルマエビなどの高価格魚は1965～70年頃から急減し、1980年に入ってから徐々に増加しつつある。養殖海苔の生産は1970年代に入って急激に伸び、75年以降徐々に減少傾向を示している。プランクトン食性の魚類や養殖海苔の水揚げが海域の富栄養化につれて大幅に伸び、一方、肉食性の食物連鎖の高位のもの、特に底生性の漁業資源の低下が顕著であった。しかし、1980年頃からわずかながら高価格魚や甲殻類の増加の兆しが見えはじめていると考えられる。

燧灘の基礎生産量を $1 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ とすると総漁獲は一次生産の0.89%に達し、極めて高いことが明らかになった。従って漁獲による海域の栄養塩の回収量も大きく、窒素及びリンの流入負荷量のそれぞれ8.7%と10.6%と見積られた。

第6章 総合考察

日本経済は1960年代から1970年代にかけて長足の進歩をとげ、国民の生活レベルも向上した。そして生産の増大と利潤追求に走り、産業活動に伴って生ずる廃棄物の処理に関しては配慮されなかった。そのために工業地帯や都市域に隣接する河川、内湾域が著しく汚染され、漁業被害、悪臭、藪場や渚の消失、景観の棄損等々が社会問題となった。それをうけて1970年代には環境保全のために水質汚濁防止法、瀬戸内海環境保全臨時措置法などが施行されるに至った。

そのような情勢の中で瀬戸内海のはぼ中央部に位置する燧灘においても、沿岸の各種産業の発展、都市部への人口流入、市街地の拡大がみられ、海域の汚染、富栄養化、漁業被害の発生という内湾における環境破壊の典型的な変化をたどることになった。特に本海域では南部の沿岸や東部海域を中心に富栄養化と有機汚染によって赤潮の発生と貧酸素水塊の形成という内湾域の人為汚染にともなう代表例ともいべき二つの大きな現象がみられるようになった。そこで本海域の富栄養化の実体を明かにするとともに、貧酸素水塊の形成機構、栄養塩を中心とした物質循環機構を解明するとともにこの間における漁業生産への影響などを調べる目的で本研究を行った。

その結果、燧灘は1960年代後半から1970年代前半にかけてはクロロフィルaの平均濃度が $10\mu\text{g/g}$ を超え、赤潮が頻発するとともに貧酸素水塊が形成されるようになり、シズクガイを主とする底生生物組成が富栄養化海域としての特徴を明瞭に示すようになったことから、過栄養の前期に至っていたと判断された。しかし、栄養塩濃度そのものは東京湾、三河湾、大阪湾に比べれば低く推移し、1980年以降これらの現象は軽減の方向に向かっていると思われる。

燧灘の汚染源の一つは伊予西条及び新居浜両市からの栄養塩の流入であり、もう一つは伊予三島、川之江両市からの紙・パルプ排水に起因する有機排水であることが明かになった。この他に1973年3月まで行われていた尿尿の海上投棄の影響も大きかったと思われる。特に燧灘の東部海域は西部海域に比べて潮汐残渣流も弱く、停滞域となっているために夏期に上下の海水温の差が著しく大きく、堆積物中の有機物濃度が高いために底層の貧酸素水塊の生成が著しく、その環境回復が大きな課題となった。

東部海域における夏期の成層の形成は流れも弱く塩分の寄与がほとんどないことから、主として温度差に基づくもので太陽放射エネルギーの大きさによって成層の安定度が左右されている。特に、本海域は最大水深が25mに過ぎないが、温度躍層が表層より5~10m深と底泥上2~5m付近と二段に形成され、底層の貧酸素水の生成は下部の第2躍層が強く形成される際に溶存酸素の鉛直方向への拡散が阻害されることにより生ずることが明らかにされた。貧酸素水塊の形成に必要な時間は1週間もあれば十分であり、盛夏であれば15日以上安定な成層が継続した後に日照不足が約3~5日あり、再び晴天が1週間以上続いた場合には、一時的に極度の貧酸素化が起こることが有り得ると結論された。

第2温度躍層下の酸素収支を見積った結果、躍層の鉛直拡散係数は $0.1\text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度であり、1970年代には製紙排水に由来する陸上起源有機物及び海域の富栄養化による内部生産有機物による酸素消費が大きかったために極度の貧酸素化が起こったと考えられた。

1980年代に入ってからこれらの酸素消費物質の負荷が減少しており、貧酸素化のレベルは明かに低下しており、DO濃度が 2.5 mg/l 以下になる確率はほとんど無いと推察された。

燧灘東部の水深25mの最深部で、窒素、リンの循環について検討した結果、海水から海底に向かっての窒素、リンの鉛直流束は 33.5 及び $6.7\text{ mg/m}^2/\text{day}$ であるが、そのうちの窒素64%、リン42%が再び海水に回帰しており、残りの窒素36%、リン58%が堆積物に固定埋没している。ただ、リンについては堆積物中の微生物活性が高

くなり、還元状態となる夏期に溶出が著しい。堆積物中のリン濃度とそのリン酸塩組成について分析した結果、還元環境下にある堆積物中のリンの濃度は好気的な堆積物に比べて有機炭素・窒素、フェオ色素が多い割には低く抑えられていた。堆積物中ではリンはカルシウム、アルミニウム、鉄と結合しているが、この三者以外の金属と結合しているリン酸塩の量が東部海域で特に少ないことも明かとなった。

上述のような環境変化にもかかわらず燧灘の総漁獲量は1966年頃から1980年頃迄に急増し約4倍に達したものの、その73%が濾過食性のカタクチイワン、シラスの水揚げによるものである。総漁獲量は基礎生産の0.89%と非常に高率を示したものの、底生性で肉食性の魚類は逆に急減した。その後、漁獲量は横ばい状態が続いているが、その漁獲内容からみて栄養段階の高次の魚が増加しており、徐々に海域の富栄養状態からの回復の兆しが見えているように思われる。漁獲による海域の窒素、リンの回収率は著しく高くそれぞれ8.7%、10.6%と見積られた。

以上のように燧灘は物理的、化学的、生物的に閉鎖的な海域特性を備えており、環境変化に非常に弱い海域といえる。従って今後の環境改善を考える上で陸上からの汚染負荷の軽減について特に配慮されるべきである。なお、今後の研究課題として燧灘全体の海水と底泥の間の物質収支を正確に求める必要があり、それに基づいて陸域から海域に負荷される栄養塩量の許容量を求めたい。

現在、産業排水の規制、無リン洗剤への転換等によって海域への窒素やリン負荷の削減が行われてきたが、観音寺市などで下水処理場が建設されたものの、その他の地域では生活排水の大部分が無処理のまま放流されているので、早急な改善が望まれる。この海域の環境保全には長期的には産業構造の転換も必要と思われる。窒素やリン及びCODの排出の特に多い産業が海水流動が弱く、水深も浅い沿岸に立地することについての問題を提示した浅海環境汚染の典型的な例であり、現在世界の沿岸各地で進行しつつある富栄養化に対する一つの教訓とすることができよう。また近年、地域振興の名のもとに沿岸域にホテル、レジャー施設が多く建設されるようになってきている。これらの建設については利用者の立場からだけでなく、その海域の生態系の保全についての配慮を十分に行って欲しいものである。更に臨海域で工場建設、リゾート開発等が計画される場合に漁業者から漁業権が買い上げられることが多い。この場合、漁業者以外の地域住民や海岸を釣り、海水浴、憩いの場などとして利用している人々の権利は無視されている。自然の海が単にその場限りの経済的な価値観だけで判断され、失われていくところに問題があるように思われる。

水産面からは1960年頃まで存在していた藻場の造成を図ることが環境回復の重要な手段である。藻場の消失原因として海中懸濁物の増加による日照不足、農薬、底引き漁法による被害等々が考えられるが、まず一定面積を有する保護水域を設けて、藻場及び魚類の幼稚仔を保護育成する方策が望まれる。またこれまで種苗放流は行政区画ごとに計画実施されてきたが、今後は燧灘全体として計画されるべきであるし、漁業そのものも、灘の魚類生産構造に合致した計画的な漁獲が継続できるよう考えられるべきである。

以上のように、1960年代中頃より最近まで燧灘の環境変化について主として化学的な側面から調査を続け、この海域の環境特性を明らかにしてきた。1980年代に入り、水質、底質が多少改善されてきたように見えるが、現状では藻場の回復などからみる限り今後とも環境保全の努力が必要であると思われる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始御懇意なる御指導をいただくと共に、本論文をまとめるに際し激励と御校閲をいただいた香川大学学長岡市友利博士に心より謝意を表します。

また、本論文を御校閲いただいた東京大学農学部水産学科山口勝己教授に心から御礼申し上げます。

さらに、本研究の実施に当たっては香川大学農学部海水利用学講座に所属していた学生諸氏の協力が不可欠であった。彼らの惜しみない協力に対し感謝いたします。調査の実施においては三豊郡漁業組合連合会小浜福重会長のひとかたならぬ援助があった。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- Bowman G. T. and J. J. Delfino (1980) Sediment oxygen demand techniques, a review and comparison of laboratory and *in situ* systems. *Water Res.*, 14, 491-499.
- Chang S. C. and M. L. Jackson (1957) Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, 84, 133-144.
- 中四国農政局香川統計情報事務所 (1958~1985) 中四国農林水産統計年報, 昭和33~60年.
- 第六管区海上保安本部 (1973) 燧灘の潮流. pp. 1-42.
- 風呂田利夫 (1987) 東京湾における青潮の発生. *水質汚濁研究*, 10, 470-474.
- 風呂田利夫 (1988) 東京湾における貧酸素水の底生・付着動物群集に与える影響について. *沿岸海洋研究ノート*, 25, 104-113.
- Hanaoka T. (1977) *JIBP Synthesis* (Hogetsu M. *et al* eds.), Univ. Tokyo Press, Tokyo. Vol. 14, pp. 267-343.
- 半田暢彦, 松枝秀和, 松永捷司, 真鍋武彦 (1984) 燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構に関する研究 (文部省環境科学特別研究報告書), pp. 63-75.
- 平田八郎, 門脇秀策 (1990) 酸素収支, 「海面養殖と養魚場環境」(渡辺競編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 28-38.
- 星加 章, 滝村 修, 塩沢孝之 (1980) 現場用溶出量測定装置の試作. *中国工業技術試験所報告*, 11, 45-51.
- 飯塚昭二, 入江春彦 (1969) 大村湾における *Gymnodinium* 赤潮発生と海底無酸素化現象との関連. *日本プランクトン学会報*, 16, 99-115.
- 飯塚昭二, 関 霽虹 (1989) 大村湾における無酸素水塊の形成. *沿岸海洋研究ノート*, 26, 75-86.
- 今林博道 (1983) 底生動物群集に及ぼす貧酸素水塊の影響. *日本水産学会誌*, 49, 7-15.
- 今林博道 (1989) 富栄養海域における底生動物群集と貧酸素水塊の相互作用. *沿岸海洋研究ノート*, 26, 119-128.
- Imasato N., T. Awaji and H. Kunishi (1980) Tidal exchange through Naruto, Akashi and Kitan Straits. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 36, 151-162.
- 城 久 (1983) 大阪湾底泥中に含まれるリンの存在形態と溶出分画. *日本水産学会誌*, 49, 447-454.
- 城 久, 矢持 進, 安部恒之, 河合 彰 (1984) 大阪湾の貧酸素底層水における無機栄養塩濃度について. *日本水産学会誌*, 50, 1693-1700.
- 城 久 (1987) 大阪湾におけるリンの循環; 形態別リンの分布特性. *沿岸海洋研究ノート*, 24, 158-168.
- 城 久 (1989) 大阪湾の貧酸素水塊. *沿岸海洋研究ノート*, 26, 87-98.
- 香川県 (1987) 燧灘東部海域環境開発調査報告書, pp. 70-222.
- 香川 哲 (1984) 燧灘東部海域の成層期における底生動物の分布. *香川県水産試験場報告*, 21, 21-26.
- 鎌谷明善, 擗 一夫, 森田良美 (1984) 東京湾堆積物中の燐の形態と鉛直分布. *日本水産学会誌*, 50, 1883-1888.
- 川田 裕, 越智 正 (1987) 燧灘東部海域環境開発調査報告書, 香川県, pp. 16-46.
- 環境庁 (1988) 昭和62年度青潮の発生機構の解明等に関する調査報告書, pp. 1-260.
- 環境庁水質保全局, (社) 瀬戸内海環境保全協会 (1985) 瀬戸内海の環境保全資料集, pp. 66-82.
- 菊池泰二 (1978) 内湾ベントス相に対する汚染の影響, 「環境科学としての海洋学2」(堀部純男編), 東京大学出版会, 東京, pp. 130-147.
- 菊池泰二, 越智 正 (1987) 燧灘東部海域環境開発調査報告書, 香川県, pp. 47-60.
- Lorenzen C. J. (1967) Determination of chlorophyll and pheopigments; Spectrophotometric equations.

- Limnol. Oceanogr., 12, 343-346.
- 松江吉行 (1961) 水質汚濁調査指針, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 128-131.
- 真鍋武彦 (1969) インドフェノール改良法による海水中微量アンモニアの直接定量法. 日本水産学会誌, 35, 897-906.
- Matsumoto E. (1975) ^{210}Pb geochronology of sediments from Lake Shinji. *Geochem. J.*, 9, 167-172.
- 松本英二, 横田節哉 (1980) 瀬戸内海における堆積と底質汚染. 海と空, 56, 135-143.
- Menzel, D. W. and R. F. Vaccaro (1964) The measurement of dissolved organic and particulate carbon in seawater. *Limnol. Oceanogr.*, 9, 138-142.
- 門谷 茂, 三島康史, 岡市友利 (1991) 大阪湾の富栄養化の現状と生物によるNとPの循環. 沿岸海洋研究ノート, 29, 13-27.
- Montani S., Y. Maita and S. Fukase (1980) Flux of nitrogen compounds in coastal marine sediment and pore water (Funka Bay, Hokkaido). *Chem. Geol.*, 30, 35-45.
- Moss B. (1967) A spectrophotometric method for the estimation of percentage degradation of chlorophylls to pheopigments in extracts of algae. *Limnol. Oceanogr.*, 12, 335-340.
- 村上彰男 (1971) 燧灘東部海域の汚濁状況調査報告書, 日本水産資源保護協会, pp. 5-12.
- 村上彰男 (1975) 海洋環境汚染に関連する地域別調査研究の現状と問題点, 瀬戸内海. 日本海洋学会誌特集号, pp. 123-136.
- Murphy J. and J. P. Riley (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta.*, 27, 31-36.
- 内海区水産研究所資源部 (1967) 瀬戸内海域における藻場の現状, 内海区水産研究所刊行物C輯, pp. 21-38.
- 中西 弘, 浮田正夫 (1990) 私信
- 日本規格協会編 (1981) J I Sハンドブック公害関係, 日本規格協会, pp. 882-884.
- 南西海区水産研究所内海資源部 (1974) 瀬戸内海の藻場, 南西海区水産研究所, pp. 1-39.
- 日本気象協会高松支部 (1982~1983) 香川県気象月報.
- 日本水産資源保護協会編 (1980) 「水質汚濁調査指針」, 恒星社厚生閣, pp. 256-257.
- Officer C. B., R. B. Biggs, J. L. Toft, L. E. Cronin, M. A. Tyler, and W. E. Boynton (1984) Chesapeake bay anoxia: Origin, development, and significance. *Science*, 223, 22-27.
- 大林萬鋪 (1987) クルマエビの標識放流. 燧灘東部海域環境開発調査報告書, 香川県, pp. 133-169.
- 小原哲二郎, 鈴木隆雄, 岩尾裕之編 (1975) 「食品分析ハンドブック」, 建帛社, 東京, pp. 751.
- 岡市友利, 越智 正, 平野正子 (1971) 燧灘東部海域の有機汚染. 香川大学農学報, 23, 104-111.
- 岡市友利 (1973) 公害と科学者, 恒星社厚生閣, 東京, pp. 63-68.
- 岡市友利, 越智 正, 門谷 茂 (1981) 内湾底泥をめぐる物質収支の動態に関する研究, 昭和55年度研究成績報告書, 東海区水産研究所, 南西海区水産研究所, 養殖研究所, 水産大学校, pp. 169-179.
- 岡市友利, 門谷 茂 (1990) 大阪湾の富栄養化の現状と生物をめぐる窒素及びリンの循環. 瀬戸内海科学, 1, 6-12.
- 小倉紀雄 (1967) 総説 海水中の腐植物質. 日本海洋学会誌, 23, 141-147.
- 越智 正, 西尾幸郎, 岡市友利 (1978) 燧灘東部海域における貧酸素層の形成. 香川大学農学報, 29, 297-304.
- 越智 正, 岡市友利 (1983) 燧灘東部海域の堆積有機物濃度について. 香川大学農学報, 34, 169-174.
- 越智 正, 武岡英隆 (1985) 「瀬戸内海の環境」(小坂淳夫編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 127-138.

- Ochi T. and H. Takeoka (1986) The anoxic water mass in Hiuchi-Nada; Distribution of the anoxic water mass. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 1-11.
- 鬼塚正光 (1989) 東京湾の貧酸素水塊. 沿岸海洋研究ノート, 26, 99-100.
- Redfield, A. C., B. H. Ketchum and F. A. Richards (1963) *The Sea* (M. N. Hill ed.) Interscience, New York, Vol. 2, pp. 26-87.
- 佐々木克之, 松川康夫, 原田 彰, 浜田真次, 波多野秀之, 渡辺利長 (1978) 海水と底泥との間の物質代謝と物質収支; 内湾底泥をめぐる物質収支の動態解明に関する研究, 昭和52年度研究成績報告書, 東海区水産研究所, 南西海区水産研究所, 真珠研究所, 水産大学校, pp. 57-75.
- 佐々木克之 (1989) 三河湾における貧酸素水塊の形成機構. 沿岸海洋研究ノート, 26, 109-118.
- 清水誠 (1988) 東京湾内湾における底棲魚介類の分布. 沿岸海洋研究ノート, 25, 96-103.
- 塩沢孝之, 川名吉一郎, 山岡到保, 星加 章, 谷本照巳, 滝村 修 (1984) 瀬戸内海における海水中の汚染物質の分布と底質からの溶出. 中国工業試験所報告, 21, 13-43.
- 関谷宏三 (1975) 「土壌養分分析法」(土壌養分測定法委員会編), 養賢堂, 東京, pp. 225-239.
- Sommers L. E., R. F. Harris, J. D. H. Williams, D. E. Armstrong, and J. K. Syers (1972) Fractionation of organic phosphorus in lake sediments. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 36, 51-54.
- Strickland J. D. H. and T. R. Parsons (1968) *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. *J. Fish. Res. Bd. Can. Bull.*, No. 167, pp. 25-29, 65-70, 185-192.
- 多々良薫 (1982) 魚類漁業に及ぼす富栄養化の影響. 「沿岸海域の富栄養化と生物指標」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 123-147.
- Takeoka H. (1984) Exchange and transport time scales in the Seto Inland Sea. *Continental Shelf Res.*, 3, 327-341.
- 武岡英隆, 越智 正 (1985) 「瀬戸内海の環境」(小坂淳夫編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 138-145.
- Takeoka H., T. Ochi and K. Takatani (1986) The anoxic water mass in Hiuchi Nada; The heat and oxygen budget model. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 42, 12-21.
- 玉井恭一 (1990) 底生生物. 「海面養殖と養魚場環境」(渡辺競編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 69-78.
- 田辺信介, 小野光広, 立川 涼 (1984) 燧灘の海洋構造と貧酸素水塊の生成機構に関する研究 (文部省環境科学特別研究報告書), pp. 77-88.
- 上野福三 (1972) 内湾性海域における生物群集の生産の動態に関する研究 (文部省環境科学特定研究, JIBP-PM-内海班, データ集) 第1号, pp. 43-45.
- Uyeno F. (1977) *JIBP Synthesis* (Hogetsu M. et al eds.), Univ. Tokyo Press, Tokyo. Vol. 14, pp. 287-288.
- 柳哲雄, 樋口明生 (1979) 瀬戸内海の恒流. 沿岸海洋研究ノート, 11, 13-22.
- 柳哲雄 (1989) シンポジウム「貧酸素水塊」, 沿岸海洋研究ノート, 26, 141-145.
- 吉田陽一 (1977) 低次生物生産段階における生物生産の変化. 「水圏の富栄養化と水産増養殖」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 92-103.

Studies on the Characteristics of Chemical Environment and the Recycling of Nutrient in Hiuchi Nada Sea Area

Summary

Hiuchi Nada sea area on which this study has been carried out locates in the central region of the Seto Inland Sea. This coastal sea covers an area of 1,300 km² with the mean depth of 17.8 m. Sea bed of the central part is rather flat and covered by muddy sediment enriched with organic matter.

Western side of the Hiuchi Nada sea area is connecting with Aki Nada sea area through Kurushima Channel and some small channels opening between Geiyo Islands. On the eastern side, the water of the Hiuchi Nada sea area exchanges with that of the Bisan Seto sea area through the water way between Numakuma Town, Hiroshima Prefecture and Shonai Peninsula, Kagawa Prefecture (Fig. 1)

Water current is very slow and a daily water exchange through western and eastern side seems to be about 30 % of the total water volume of the Hiuchi Nada sea area. These geographical and topographical characters of this area cause the water to be stagnant and easily suffered from the infection of man-made loading of pollutions.

Along the south coast of the Hiuchi Nada sea area, various industries such as copper refining, fertilizer, and paper making industries have been operated since many years ago. In 1960s and 1970s, the Hiuchi Nada sea area was polluted especially by these wastes, together with domestic wastes and agricultural runoffs. Eutrophication and organic pollution revealed their bad influences causing the outbreaks of red tide and the formation of oxygen-deficient water mass or anoxic waters.

An average concentration of chlorophyll *a* in the sea water in June around 1965 to 1975 reached above 10 $\mu\text{g}/\text{l}$. The sediments in the coastal areas of Iyo-mishima City and Kawanoe City were polluted by the waste of paper industries.

The bottom sediments sampled at the deepest water area of the north-eastern part of the Hiuchi Nada contained 25 mg/g organic carbon and 57 $\mu\text{g}/\text{g}$ pheopigments. Sources of these organic matters in bottom sediment seemed to be attributed partially to phytoplankton blooms and mainly to the industrial wastes. In this area, the concentration of dissolved oxygen in bottom water almost decreased to the level of 0 mg/l in summer due to the decomposition of organic matter and the formation of stable stratification of the water column. The oxygen-deficient water in the bottom layer appeared when surface-water temperature reached the maximum of about 25 °C, and continued for about two months until the stratification was destroyed.

Development of the stratification in the north-eastern part in summer was depended on the relative difference of water temperature between the surface and the bottom layers. In early summer, the upper thermocline appeared at about 10 m depth from the surface and the lower thermocline was formed in bottom layer between 2 and 5 m above the bottom bed on the continuation of the stratification. The oxygen-deficient water was observed below this lower thermocline. In summer of 1983, oxygen

consumptions by the bottom water below the lower thermocline and that by the bottom sediment were estimated to be 1.05 and 0.49 mg/m²/day, respectively

Nutrient concentrations in oxygen-depleted water were considerably high but were low in the upper-layer water in summer season. The vertical fluxes of organic nitrogen and phosphorus were 33.5 and 6.71 mg/m²/day, respectively, in summer between 1982 and 1985, and 63 % of nitrogen flux and 42 % of phosphorus flux were released from sediment to the sea water.

To make clear the influence of eutrophication and organic pollution on fisheries of this sea area, fish catches during 1957 to 1987 recorded by four fisheries co-operatives in the eastern Hiuchi Nada sea area were examined. The total catches increased considerably from 1965 to 1975. Main productions were achieved by the catch of anchovy and their post larvae which occupied 91.3 % of the average total catch. The increase of anchovy catch seemed to be due to the proceeding of the eutrophication. Red sea bream, flatfish, "Kuruma" prawn, and other shrimps which were benthic, carnivorous fishes extremely decreased in 1960s and 1970s. Total catch corresponded to 0.89 % of primary production of the eastern part of the Hiuchi Nada sea area in 1980s.

香川大学農学部紀要

- 第1号 幡 克 美：アカマツ材の成分並びにパルプ化に関する研究（1955年3月）
- 第2号 内 藤 中 人：植物成長ホルモンに関する植物病理学的研究 特に植物病原菌に及ぼす影響について
（1957年10月）
- 第3号 松 沢 寛：アオムシコマユバチの生態に関する研究（1958年3月）
- 第4号 梶 明：和紙原料の醸酵精練に関する研究（1959年3月）
- 第5号 森 和 男：傾斜地蜜柑園経営の構造分析（1960年3月）
- 第6号 玉 置 鷹 彦：ガラク並びに池泥の研究（1960年3月）
- 第7号 上 原 勝 樹：傾斜地開発利用に関する物理気象の研究（1961年3月）
- 第8号 桑 田 晃：オクラとトロロアオイとの種間交雑およびそれらより育成された種々の雑種ならびに
倍数体に関する研究（1961年9月）
- 第9号 中 潤三郎：甘藷の生育過程に関する作物生理学的研究（1962年3月）
- 第10号 斉 藤 実：香川県及び北愛媛県の地質について（1962年3月）（英文）
- 第11号 小 杉 清：グラジオラスの生産と開花に関する研究（1962年9月）（英文）
- 第12号 吉 良 八 郎：貯水池の滞砂に関する水理学的研究（1963年2月）
- 第13号 野 田 愛 三：禾穀類の根軸に関する研究（1963年3月）
- 第14号 川 村 信一郎：豆類のデンプンの研究（1963年3月）（エスペラント文）
- 第15号 浅 野 二 郎：種子の耐塩性を中心とした海岸地帯におけるアカマツおよびクロマツ林の成立に関する
研究（1963年3月）
- 第16号 山 中 啓：乳酸菌のペントース・イソメラーゼに関する研究（1963年8月）（英文）
- 第17号 葦 沢 正 義：香川県における葡萄の早害に関する研究（1964年3月）
- 第18号 谷 利 一：カキ炭疽病の病態生理学的研究，とくに罹病果実の病徴発現にあずかるペクチン質分
解酵素の役割（1965年3月）
- 第19号 樽 谷 隆 之：カキ果実の貯蔵に関する研究（1965年3月）
- 第20号 狩 野 邦 雄：ラン種子の発芽培地に関する研究（1965年3月）（英文）
- 第21号 山 本 喜 良：コモンベッチおよびその近縁種の雑種に関する研究（1965年3月）
- 第22号 中 広 義 雄：鶏における飼料の消化率測定法に関する研究（1966年10月）
- 第23号 井 上 宏：ナツダイダイの果実発育に関する研究，とくに水腐病の発生機構を中心として（1967
年3月）
- 第24号 宮 辺 豊 紀：異常乳の生成と塩類均衡とくにカゼインリン酸カルシウムに関する研究（1967年8月）
（英文）
- 第25号 十 河 村 男：樹皮リグニン及び樹皮フェノール類に関する研究（1971年9月）
- 第26号 大 島 光 昭：赤クローバーサイレージ中の窒素栄養源に関する研究（1971年11月）（英文）
- 第27号 辰 巳 修 三：林木葉部中におけるカルシウムの化合形態とその生理に関する基礎的研究（1974年11
月）
- 第28号 樽 谷 勝：ブドウの葉脈黄変による早期落葉の研究（1974年12月）
- 第29号 倉 田 久 男：カボチャ・スイカの性の分化におよぼす日長および温度の影響に関する研究（1976年
3月）

- 第30号 鎌田 萬：中小河川治水計画に適用する計画降雨の合理的算定法に関する研究（1976年6月）
- 第31号 山本 弘 幸：エンバク冠さび病の抵抗性発現機構に関する研究（1978年3月）
- 第32号 岡本 秀 俊：テントウムシの摂食の生態に関する実験的研究（1978年3月）
- 第33号 山崎 徹：*p*-ヒドロキシフェニル並びにシリングリグニンに関する研究（1978年9月）（英文）
- 第34号 市川 俊 英：イネを加害する4種の同翅亜目頸類群昆虫の配偶行動に関する研究（1979年2月）
（英文）
- 第35号 吉田 博：農業生産共同組織の展開・構造・運営に関する研究（1980年3月）
- 第36号 一色 泰：鶏盲腸の栄養生理学的研究（1980年3月）
- 第37号 中條 利 明：富有カキ果実の発育ならびに品質に及ぼす温度条件に関する研究（1982年2月）
- 第38号 五井 正 憲：温帯花木の花芽形成ならびに開花調節に関する研究（1982年2月）
- 第39号 松井 年 行：和三盆糖の食品学的研究（1982年2月）
- 第40号 藤目 幸 擴：ハナヤサイ類の花らい形成並びに発育の温度条件に関する研究
—特に異常花らいについて—（1983年2月）
- 第41号 西山 壯 一：カンガイ用管水路における空気混入流の水撃作用に関する研究（1983年2月）
- 第42号 真山 滋 志：エンバク冠さび病の抵抗性発現におけるアベナルミンの役割（1983年10月）（英文）
- 第43号 門谷 茂：海洋堆積物中のアミノ酸の初期統成過程に関する研究（1983年10月）
- 第44号 一井 真比古：水稻育種における再生茎形質の選抜指標としての効用に関する研究（1984年11月）
（英文）
- 第45号 片岡 郁 雄：ブドウ果実の着色に関する研究
—とくにアブジジン酸による着色の制御について—（1986年10月）
- 第46号 鈴木 晴 雄：畑地栽培におけるフィルムマルチと植被が地温に及ぼす影響に関する農業気象学的研究（1986年10月）
- 第47号 蓑輪 雅 好：解放型畜舎内の放射熱環境に関する研究（1986年10月）
- 第48号 藤田 政 之：サツマイモ塊根組織のチトクロムP-450系酵素に関する研究（1986年10月）
- 第49号 田中 道 男：組織培養によるファレノプシスの栄養繁殖に関する研究（1987年2月）
- 第50号 長谷川 晴：東洋系シンビジウムの繁殖に関する研究（1987年12月）
- 第51号 笠井 忠：大豆の少糖類の加水分解に関する研究（1987年12月）
- 第52号 青柳 省 吾：四国北部の瀬戸内沿岸における花崗岩風化残積土（マサ土）および安山岩風化残積土の土壌特性に関する研究（1987年12月）
- 第53号 片山 健 至：*Fusarium solani* M-13-1によるリグニンサブストラクチャーモデル化合物の分解
（1989年11月）（英文）
- 第54号 増田 拓 朗：植栽基盤としてのマサ土の問題点とその改良法に関する研究（1990年10月）
- 第55号 多田 邦 尚：海水中の溶存タンパク様物質およびアミノ酸の動態に関する研究（1990年10月）
- 第56号 深井 誠 一：ダイアンサスおよびキク属植物における茎頂の凍結保存に関する研究（1992年10月）
- 第57号 吉田 裕 一：イチゴの花器および果実の発育に関する研究
—‘愛ベリー’の奇形果発生を中心として—（1992年10月）
- 第58号 越智 正：燧灘の化学環境特性と物質循環に関する研究（1992年10月）

Memoirs of Faculty of Agriculture, Kagawa University

- No.1 Katsumi HATA : Studies on the Constituents and Pulping of "Akamatsu" (*Pinus densiflora* SEB et ZUCC) Wood (March, 1955)
- No.2 Nakato NAITO : Phytopathological Studies Concerning Phytohormones with Special Reference to Their Effect on Phytopathogenic Fungi (October, 1957)
- No.3 Hiroshi MATSUZAWA : Ecological Studies on the Braconid Wasp, *Apanteles glomeratus* (March, 1958)
- No.4 Akira KAJI : Studies on the Retting of Plant Fiber Materials for Japanese Paper Manufacture (March, 1959)
- No.5 Kazuo MORI : An Analytical Study on the Structure of the Mandarin Orange Growing Orchard Farm in a Sloping Land Region (March, 1960)
- No.6 Takahiko TAMAKI : Studies of Garaku Paddy Soil and Reservoir Deposits (March, 1960)
- No.7 Masaki UEHARA : Physical and Meteorological Studies on the Cultivation and Utilization of Slope Land (March, 1961)
- No.8 Hikaru KUWADA : Studies on the Interspecific Crossing between *Abelmoschus esculentus* MOENCH and *A. Manihot* MEDIC and the Various Hybrids and Polyploids Derived from the Above Two Species (September, 1961)
- No.9 Junzaburo NAKA : Physiological Studies on the Growing Process of Sweet Potato Plants (March, 1962)
- No.10 Minoru SAITO : The Geology of Kagawa and Northern Ehime Prefectures, Shikoku, Japan (March, 1962) (in English)
- No.11 Kiyoshi KOSUGI : Studies on Production and Flowering in Gladiolus (September, 1962) (in English)
- No.12 Hachiro KIRA : Hydraulical Studies on the Sedimentation in Reservoirs (February, 1963)
- No.13 Aizo NODA : Studies on the Coleorhiza of Cereals (March, 1963)
- No.14 Sin'itiro KAWAMURA : Studoj pri Ameloj de Legumenoj (March, 1963) (in Esperanto)
- No.15 Jiro ASANO : A Study on the Formation of Pine Forests on Seaside Areas, giving due Consideration to the Salt Resistance of the Seeds (March, 1963)
- No.16 Kei YAMANAKA : Studies on the Pentose Isomerases of Lactic Acid Bacteria (August, 1963) (in English)
- No.17 Masayoshi ASIZAWA : Studies on the Drought Damage of Grape Trees in the Region of Kagawa Prefecture (March, 1964)
- No.18 Toshikazu TANI : Studies on the Phytopathological Physiology of Kaki Anthracnose, with Special Reference to the Role of Pectic Enzymes in the Symptom Development on Kaki Fruit (March, 1965)
- No.19 Takayuki TARUTANI : Studies on the Storage of Persimmon Fruits (March, 1965)
- No.20 Kunio KANO : Studies on the Media for Orchid Seed Germination (March, 1965) (in English)
- No.21 Kiyoshi YAMAMOTO : Studies on the Hybrids among the *Vicia sativa* L and its Related Species (March, 1966)
- No.22 Yoshio NAKAHIRO : Studies on the Method of Measuring the Digestibility of Poultry Feed (October,

- 1966)
- No.23 Hiroshi INOUE : Studies on the Fruit Development of Natsudaidai (*Citrus Natsudaidai* HAYATA), with Special Reference to Water Spot Injury (March, 1967)
- No.24 Toyoki MIYABE : Studies on the Production and the Salt Balance in Relation to Calcium Phosphocaseinate of Abnormal Milk (August, 1967) (in English)
- No.25 Murao SOGO : Studies on the Bark Lignin and Bark Phenolic Compounds (September, 1971)
- No.26 Mitsuaki OHSHIMA : Studies on Nutritional Nitrogen from Red Clover Silage (November, 1971) (in English)
- No.27 Shuzo TATSUMI : Fundamental Studies of the Chemical Forms of Calcium and Their Metabolisms in the Tree Leaves (November, 1974)
- No.28 Masaru KURETANI : Studies on the Early Summer Defoliation of Grape Vines Caused by Veinyellowing (December, 1974)
- No.29 Hisao KURATA : Studies on the Sex Expression of Flowers Induced by Day-length and Temperature in Pumpkin and Watermelon (March, 1976)
- No.30 Takashi KAMADA : Studies on the Rational Estimation of Rainfall for Design Flood (June, 1976)
- No.31 Hiroyuki YAMAMOTO : Study on the Mechanism of Resistance Expression in the Crown Rust Disease of Oat (March, 1978)
- No.32 Hidetoshi OKAMOTO : Laboratory Studies on the Food Ecology of Aphidophagous Lady Beetles (Coleoptera : Coccinellidae) (March, 1978)
- No.33 Toru YAMASAKI : Studies on *p*-Hydroxyphenyl- and Syringyl Lignins (September, 1978) (in English)
- No.34 Toshihide ICHIKAWA : Studies on the Mating Behavior of the Four Species of Auchenorrhynchous Homoptera which Attack the Rice Plant (February, 1979) (in English)
- No.35 Hiroshi YOSHIDA : A Study of the Development, Structure and Management of Co-operative Groups (March, 1980)
- No.36 Yutaka ISSHIKI : Nutritional and Physiological Studies on the Function of Ceca in Chickens (March, 1980)
- No.37 Toshiaki CHUJO : Studies on the Effects of Thermal Conditions on the Growth and Quality of Fruits of Fuyu Kaki (February, 1982)
- No.38 Masanori GOI : Studies on the Flower Formation and Forcing of Some Ornamental Trees and Shrubs in East Asia (February, 1982)
- No.39 Toshiyuki MATSUI : Food Chemical Studies on Wasanbon-to Sugar (Japanese traditionally refined sugar) (February, 1982)
- No.40 Yukihiro FUJIME : Studies on Thermal Conditions of Curd Formation and Development in Cauliflower and Broccoli, with Special Referene to Abnormal Curd Development (February, 1983)
- No.41 Souichi NISHIYAMA : Studies on the Water Hammer of the Air-entrained Flow in Irrigation Pipe Lines (February, 1983)
- No.42 Shigeyuki MAYAMA : The Role of Avenalumin in the Resistance of Oats to Crown Rust (October, 1983) (in English)

- No.43 Shigeru MONTANI : Early Diagenesis of Amino Acids in Marine Sediments (October, 1983)
- No.44 Masahiko ICHI : Studies on the Utility of Ratoon Traits of Rice as the Indicator of Agronomic Characters in Breeding (November, 1984) (in English)
- No.45 Ikuo KATAOKA : Studies on the Coloration of Grape Berries with Special Reference to the Regulation of Color Development by Abscisic Acid (October, 1986)
- No.46 Haruo SUZUKI : Agrometeorological Studies on the Effect on Soil Temperature, of Film Mulching and Canopy in the Upland Mulching Culture (October, 1986)
- No.47 Masayoshi MINOWA : A Study on Thermal Radiation Environment in an Open-type Livestock Barn (October, 1986)
- No.48 Masayuki FUJITA : Studies on Cytochrome P-450-Dependent Mixed Function Oxygenase in Sweet Potato Root Tissue (October, 1986)
- No.49 Michio TANAKA : Studies on the Clonal Propagation of *Phalaenopsis* through *in vitro* Culture (February, 1987)
- No.50 Atushi HASEGAWA : Studies on the Propagation of Oriental Cymbidium (December, 1987)
- No.51 Tadasi KASAI : Studies on the Hydrolysis of Oligosaccharides of Soybeans (December, 1987)
- No.52 Shogo AOYANAGI : Studies on the Physical Properties of Residual Granitic and Andesitic Soils in Setouchi Coastal Region, Northern Shikoku (December, 1987)
- No.53 Takeshi KATAYAMA : Degradation of Lignin Substructure Model Compounds by *Fusarium solani* M-13-1 (November, 1989) (in English)
- No.54 Takuro MASUDA : Studies on the Characteristics of Masa Soil as a Medium for Tree Growth and Methods for its Improvement (October, 1990)
- No.55 Kuninao TADA : Behavior of Dissolved Proteinous Substances and Amino Acids in Seawater (October, 1990)
- No.56 Seiichi FUKAI : Studies on the Cryopreservation of Shoot Tips of *Dianthus* and *Chrysanthemum* (October, 1992)
- No.57 Yuichi YOSHIDA : Studies on Flower and Fruit Development in Strawberry, with Special Reference to Fruit Malformation in 'Ai-Berry' (October, 1992)
- No.58 Tadashi OCHI : Studies on the Characteristics of Chemical Environment and the Recycling of Nutrient in Hiuchi Nada Sea Area (October, 1992)

平成4年10月25日印刷 平成4年10月30日発行

香川県木田郡三木町

香川大学農学部

印刷所 アート印刷株式会社

香川県木田郡三木町池戸1779番地13

電話(0878)91-0170番