グローバル変動検知のための瀬戸内海の総合的モニタリング

武岡 英隆*
*愛媛大学沿岸環境科学研究センター

要旨：大規模な海洋循環のレジームシフトが太平洋と瀬戸内海の境界付近の密度流の変動に現れること、および、栄養塩が陸からだけでなく、このような密度流により太平洋から流入してくることが近年判明した。したがって、グローバル変動が瀬戸内海の栄養塩環境に影響を与えている可能性がある。このような問題意識に基づいて、愛媛大学沿岸海洋科学研究センターでは、佐田岬先端部に栄養塩など生物地球化学項目の自動監視システムを設置した。このような固定ステーションにおける時系列計測とフェリー等による時空間変動計測の相互補完により、地球環境変動とその瀬戸内海への影響を包括的にとらえることが可能になると考えられる。

キーワード：瀬戸内海・グローバル変動・栄養塩・固定点モニタリング・長期時系列

1．まえがき

近年、地球温暖化の他に、窒素やリンなどの主要元素の循環に関するグローバルな変動が現実的になりつつある。大気変動の場合には、大気圏が比較的速く混合するため、ハワイのマウナロアなどの比較的少数のモニタリングステーションでグローバルな変動を比較的よく代表する結果が得られている。海洋においても有効なモニタリング体制を整備することが緊急の課題となっているが、その際重要なことは、大洋域のみならず、重要な生物生産の場である沿岸海域においてもこうした将来の環境変動の予測のための監視が極めて重要なことである。

沿岸域生態系の変動の基本的要因の一つは栄養塩環境の変動であるが、いわゆる縁辺海は別として、瀬戸内海のような閉鎖的な沿岸海域では、地球規模の環境変動が栄養塩環境に影響を与えるという認識はこれまでほとんどなかったと思われる。これは勿論、こうした閉鎖的沿岸海域の栄養塩の起源が陸域にあり、ローカルな人間活動の変動による栄養塩負荷の変動がそこでの栄養塩環境の変動の主要因と考えられていたからである。しかし、瀬戸内海においても外洋から栄養塩が流入していることが最近明らかになりつつあり、その量の多寡によっては外洋の海水循環の変動が瀬戸内海の栄養塩環境の変動に影響を与える可能性がある。したがってこのことは、将来の環境変動の予測や陸域からの栄養塩負荷の制御等の環境保全対策のあり方にも影響を与える大きな問題である。このため、瀬戸内海の栄養塩収支を明らかにすることや、栄養塩環境の変動を監視して変動原因を解明すること等が重要な研究課題となっている。

本報では、このような外洋から瀬戸内海の栄養塩の供給とその変動について最近の知見をまとめ、このような問題意識に基づいた我々のモニタリング計画について紹介する。

2．外洋から瀬戸内海への栄養塩の流入とその変動

2.1 外洋から瀬戸内海への栄養塩の流入

藤原ほか(1997)[1]は、夏季の紀伊水道と豊後水道での観測によって、太平洋から両水道を通して瀬戸内海へ窒素が流入していることを示した。その流量は、紀伊水道では 170 トン/日、

豊後水道では 70 トン/日であり、その和は瀬戸内海全体に陸から流入する量の半分程度にもなる。これらのうち、夏季における太平洋から豊後水道への栄養塩の流入は、Kaneda *et al.*(投稿中)[2] によって外洋海水の底層進入（bottom intrusion）と呼ばれている現象によるものと考えられる。この現象は、南部の陸棚斜面域の底層からはい上がってきた冷水が豊後水道底層に流入するもので、ガルフストリーム海域で bottom intrusion と呼ばれているものと類似の現象である。小泉(1999)[3] は、1994 年夏季の約半月の間に 6 回にわたる反復観測を行ってこの現象を明確にとらえ、この冷水が豊富に栄養塩を含むことも明らかにしている。小泉(1999)[3] によると、この下層への流入によって豊後水道に供給される窒素の量はおよそ 2000 トンにも達する。

Kaneda et al.(投稿中)[2] は、豊後水道下層への低温水の流入がどのような時間スケールで起こるかを明らかにするため、Fig.1 に示した豊後水道東岸の内海（うちうみ）の海面下 5m と海面下 68m（海底上 2m）において水温の連続観測を行った。Fig.2 は 1995 年から 1996 年にかけてのその観測結果である。図のように 1995 年 6 月から 7 月末にかけて底層の水温は急激な低下と緩やかな上昇を繰り返しながら段階的に低下しており、この急低下が間欠的な bottom intrusion の発生を表していると考えられる。底層水温は 7 月末の極小後次第に上昇するが、その間にも急低下は 11 月半ば頃まで繰り返し起こっている。

このような豊後水道での観測結果から考えても、夏季における太平洋から瀬戸内海への栄養塩の流入は確かなことと思われるが、問題はその量である。藤原ほか(1997)[1]の示した値は短期間の観測に基づくものであり、この値を夏季の全期間に適用できるかどうかはわからない。実際 Fig.2 によると、豊後水道の底層水温は 7 月末に最低になった後、10 月頃まで上昇しているが、この上昇は豊後水道の底層水が太平洋側へ流出したことによって起こっていると推定され[2]、同時に栄養塩も太平洋へ流出していると考えられる。従って、太平洋から瀬戸内海への栄養塩の流入の時期は限られていて、量もそれほど多くはないかもしれない。しかし、そうだとしても、陸からの流入量に近い量の栄養塩が常時外洋へ流出しているような状況とは、瀬戸内海での栄養塩の貯留量や海域による相違、季節変化などに大きな違いがあるものと考えられる。

2.2　近年の豊後水道の環境変化

Fig.3 に、愛媛県水産試験場が豊後水道の定点で毎月行っている観測結果から、豊後水道中央部における 5 月～10 月の平均水温の最近 15 年間の変動を示す(Takeoka *et al.* (2000)[4])。この図によると、50m と 75m では高水温が最近数年間続いていることがわかる。この下層の水温の最近の傾向は、夏季の下層からの bottom intrusion が最近弱まっており、この結果、栄養塩の流入も弱まっていることを示している。豊後水道下層の栄養塩は、速吸瀬戸の強い潮流による鉛直混合や、東西両岸の複雑な地形によって発生した渦などによる効果的な鉛直混合[5, 6]、急潮による沿岸の湾の効果的な海水交換[7] などの海水の運動によって有光層にもたらされ、夏季の豊後水道の生物生産を支えている。したがって、近年の豊後水道下層の高温傾向は、豊後水道の生物生産の低下を招いていると考えられる。Fig.4 に、小泉(1998)[8] による愛媛県水産試験場地先の下波湾における珪藻類の植物プランクトン濃度の経年的変化を示す。この図から、最近の豊後水道では植物プランクトンの生産性の低下が実際に起こっていることがわかる。豊後水道では 1996 年よりアコヤ貝の大量斃死が起こっており、この原因については未だ最終的な結論が得られていないが、アコヤ貝の餌となる珪藻類の減少が大量斃死を助長した可能性

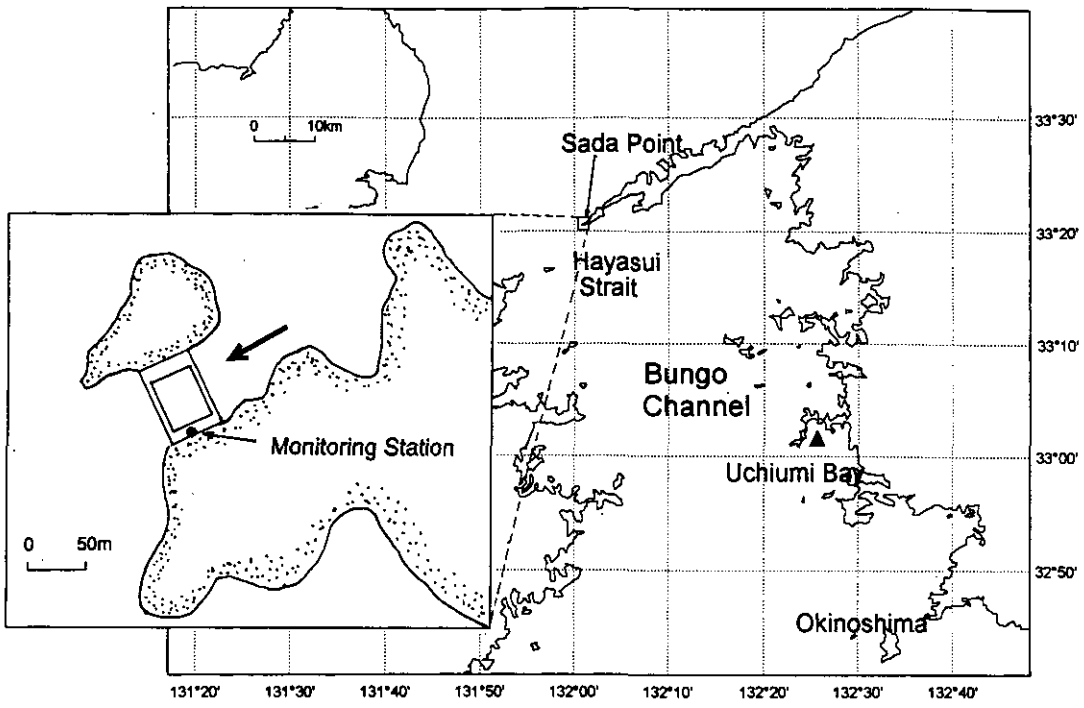


Fig1. Map of the Bungo Channel and Sada Point. The autonomous coastal water quality monitoring system is placed at the sea water pool located at Sada Point. The thick arrow denotes the main direction of the current.

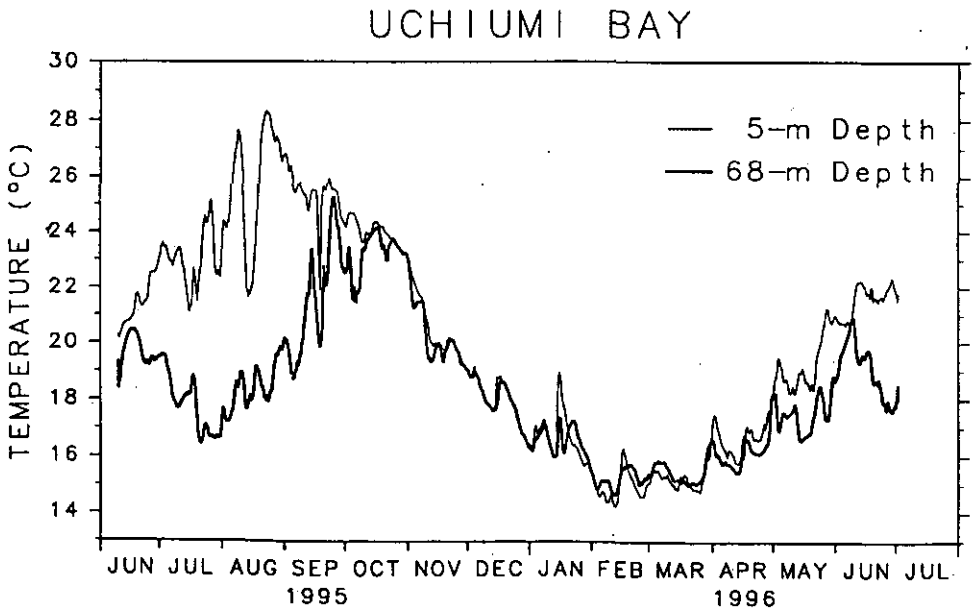


Fig.2 Surface and bottom water temperature observed at the station denoted by the closed triangle in Uchiumi Bay (Fig.1) during June 1995 to July 1996 (after Kaneda *et al.*(MS)[2]).

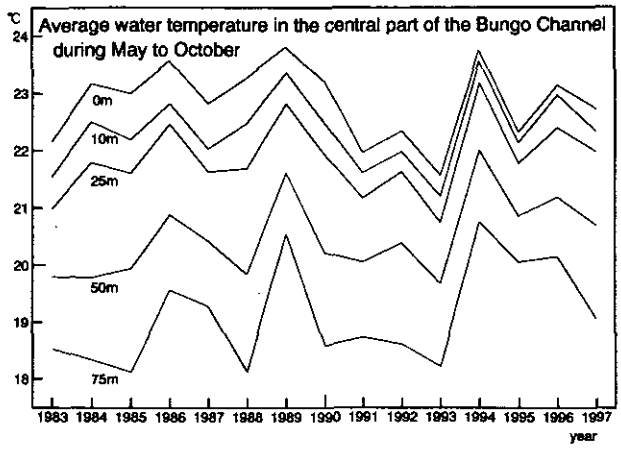


Fig.3 Year-to-year variation of the water temperature at the central region of the Bungo Channel averaged over May to October.

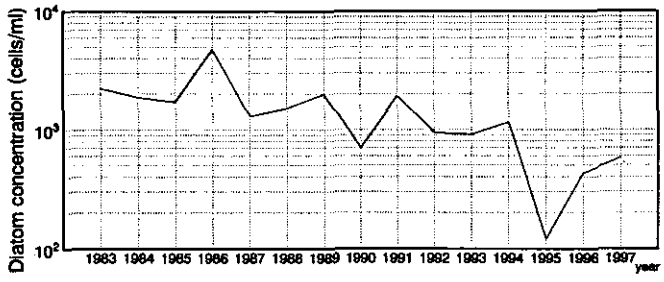


Fig.4 Year-to-year variation of the diatom concentration in Shitaba Bay averaged over May to September (after Koizumi (1998)[7]).

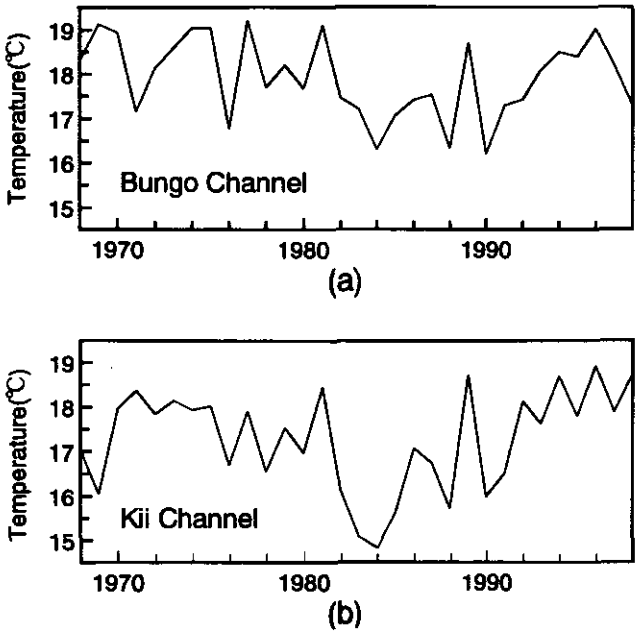


Fig.5 Year-to-year variation of the water temperature at 100m averaged over May to October layer on the shelf edge region south of the Bungo Channel (a) and on the shelf slope region south of the Kii Channel (b).

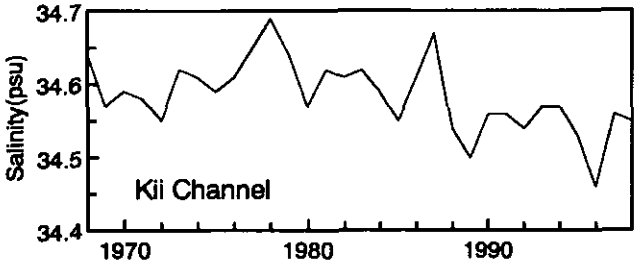


Fig.6 Year-to-year variation of the salinity at 100m averaged over May to October layer on the shelf edge region south the Kii Channel.

は考えられる。なお、豊後水道における急潮や bottom intrusion の長期変動については Takeoka et al.(2000)[4]に詳しく述べられている。

2.3　豊後水道及び紀伊水道南部の水温・塩分の長期変動

前章に示したような豊後水道における最近の傾向が紀伊水道にも共通であるかどうかを調べるため、愛媛県水産試験場による豊後水道南部の観測結果と徳島県水産試験場による紀伊水道南部の観測結果を用いて解析してみた。いずれも毎月 1 回の沿岸定線観測の結果である。Fig.5(a)は、豊後水道南部陸棚縁付近の 100m 層における水温の 5 月から 10 月までの平均値の 1969 年から 1998 年までの変化である。また Fig.5(b)は、紀伊水道南部陸棚斜面域における同様の図である。これらの図からわかるように、両者の変動の傾向はかなりよく似ており、最近の豊後水道の高温傾向が豊後水道だけの局所的な現象ではなく、大規模な現象であることがわかる。このことから、最近の豊後水道における bottom intrusion の弱まりとそれによる栄養塩供給の減少は、外洋の大規模な海水循環の変動によるものであると考えられる。

ところで Fig.5 は、1990 年代に入っての高温傾向に加え、1970 年代にも高温の時期があったことを示している。これらの 2 つの高温期が同じ原因によるものか否かは、将来のこれらの水温の変動傾向を予測する上で重要な情報となる。もし同じ原因であるならば、これらの高温期は 20 年程度の周期の変動である可能性があり、もし別の原因であるとすれば、1990 年代の高温期は過去 30 年間に見られなかった、より長周期の変動であることになるからである。そこで、塩分と水温の関係について検討してみた。Fig.6 は、紀伊水道南部の陸棚斜面域における塩分についての Fig.5 と同様の図である。豊後水道側の塩分についてはいくつかの欠測があり、良好な平均値が得られないため示していない。この図の塩分は 1970 年代から 1990 年代にかけて全般的に低下している。従って、1970 年代と 1990 年代の 2 つの高温期を引き起こした機構は別のものである可能性が高く、最近の高温傾向は少なくとも 30 年以上の時間スケールの現象であると考えられる。

3．愛媛大学 CMES におけるモニタリング計画

2 章で示したように外洋の変動の影響が豊後水道に現れていることは、地球規模の環境変動による外洋の海水循環の変動が予想される中で、瀬戸内海の栄養塩環境が地球規模の環境変動と無関係ではないことを示している。愛媛大学沿岸環境科学研究センター(CMES)では、こうした瀬戸内海の栄養塩環境の変動を検出するため、以下のようなモニタリングを計画あるいは実施している。

①佐田岬における栄養塩等の連続自動観測

②豊後水道沿岸域における水温の連続観測

③室戸岬付近の深層水（海面下 320m）の塩分の連続観測

①は、佐田岬半島先端部において自動観測システムによって、水温、塩分、pH、溶存酸素濃度、クロロフィル蛍光、硝酸態窒素、アンモニア態窒素、リン酸態リン、珪酸態珪素、動物プランクトン数を測定するものである。佐田岬先端部には、Fig.1 に示すように海を仕切って造成した三崎漁協の蓄養池があり、栄養塩観測システムは同漁協の御協力によりここの附属施設内に平成 12 年 3 月に設置した。サンプル海水はポンプにより揚水され、各測定機器を循環して排水されるが、試薬などを加えた排水はタンクに保存して後日処理される。海水は蓄養池外から採取したいが、この付近は冬季の波浪が激しくてポンプやパイプが破損する可能性が非

常に高いため、今のところこの蓄養池内から揚水し測定に供している。蓄養池には外海との２つの隔壁にそれぞれ７個ずつ開けられた通水口を通して海水が流入するようになっている。このシステムにより、現在１時間毎の自動測定を行っており、測定データは電話回線により随時取得することができる。これまでに取得されているデータの一部を参考までに Fig.7 に示す。アンモニア態窒素についてはほとんど検出限界以下であるため、またクロロフィルについてはまだ機器の調整中であるため、ここには示していない。この場所にこのシステムを設置した目的やどのような性質のデータが取得できるかについては次章に述べる。なお、このシステムによる各項目の測定法等の詳細は、Kimoto(1995)[9]、紀本(1997)[10]、Kusakabe et al.(1999)[11]等を参照されたい。

②は、豊後水道沿岸域の複数点に配置した水温ブイから ORBCOM 衛星経由でデータを取得するものである。取得したデータは、ほぼリアルタイムでインターネットにより公開することを予定している。当面は高知県の沖の島(Fig.1 参照）に１基の水温ブイを設置し、今後宇和海沿岸の漁協や愛媛県漁連等と協力して水温ブイを増やしていく計画である。これらのシステムは、急潮による水温変動を把え或いは予報して水産業などに役立てることを主な目的とするものである。しかし、年による急潮の強度の変化と bottom intrusion の強度の変化は関連が深いことが分かっているため、間接的には bottom intrusion のモニターにもなる。また、愛媛県漁連は宇和海南部の内海の測点(Fig.1▲印）にすでにサーミスタチェーンを用いたブイシステムを設置し、海面下２ｍから６０ｍまでの９層の水温のモニタリングを行っている。このデータは衛星船舶電話で送られているが、これを上記の水温システムにリンクさせる計画であり、bottom intrusion の直接的なモニターも行うことができる。

③は、高知県海洋深層水研究所と協力し、同所が室戸岬東岸沖の海面下 320m から汲み上げている海水の塩分をモニターするものである。これは、紀伊水道南部陸棚斜面水の動きをモニターすることを目的としている。

４．佐田岬のモニタリング定点の特徴

これまでに述べてきたように、佐田岬に栄養塩観測システムを設置した直接の動機は、外洋からの栄養塩供給の変動をモニターすることである。そのためには、豊後水道の底層あるいは各層の栄養塩濃度や流速をモニターすることが最も適切である。しかし、単なる水温の測定システム等とは違い、大規模で高価なこのシステムにはまだ必然的に多くの制約がある。例えば豊後水道底層の栄養塩をモニターするためには、現場に大規模なブイを浮かべるか、なるべく沖合に突き出た半島の先端付近に施設を設けて海水を底層から揚水する必要がある。いずれにしても、観測機器以外の周辺施設に大きな費用がかかることになり、現在の我々の予算規模では不可能である。このため、海に隣接した既存の施設を利用するしかない。このような現実的で絶対的な条件を満たしたうえで、外洋からの栄養塩供給のモニターという条件をある程度満たすものとして選んだのが佐田岬の測点である。

この海域は速吸瀬戸の強い潮流により水平的にも鉛直的にもよく混合した海域であり、空間的に代表性の高いデータを得ることができる。このようなデータは、bottom intrusion による栄養塩供給量の直接のモニターとはならないが、栄養塩供給の変動の結果としての栄養塩濃度の変動をモニターできる可能性がある。一方、瀬戸内海内部に陸域から供給された栄養塩についても当然このデータに含まれてくることになる。これらを分離することは容易ではないかもし

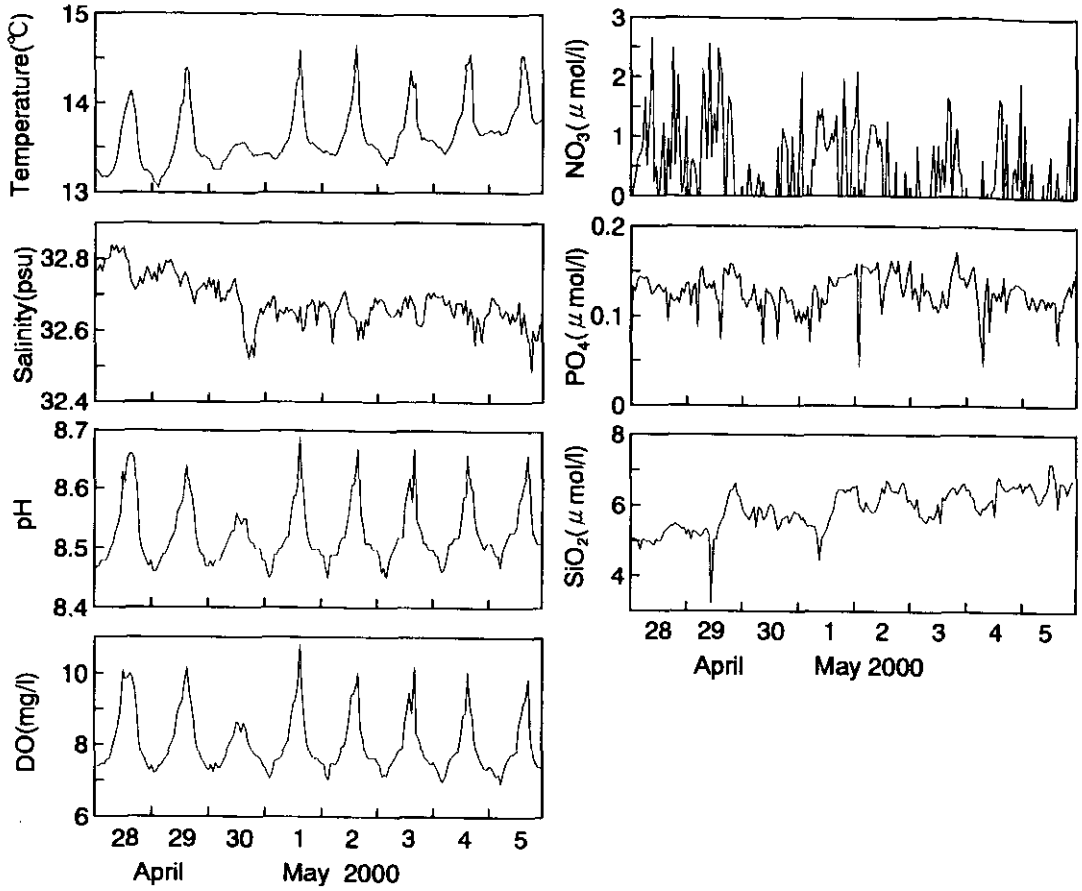


Fig7. Esamples of the data obtained by the autonomous coastal water quality monitoring system during 28 April to 5 May, 2000.

れないが、水温、塩分やN、P、Siの比などがこれらを分離する手がかりになる可能性がある。また、2.1 に述べたような瀬戸内海の栄養塩収支についての考察から、この海域では夏季に外洋起源の栄養塩の比率が高く、冬季に内海起源の栄養塩の比率が高くなる可能性も考えられる。いずれにせよ、この測点のデータのみでなく周辺の海域での諸データも含めた総合的解析によって、外洋からの影響の長期的変動のモニターという目的を達成していきたいと考えている。

5．あとがき

佐田岬における栄養塩モニタリングは、1点における時系列であるが、時空間変動を把握すること、および、瀬戸内海内部の変動を把握することが、このような変動を包括的にとらえることに寄与するだろう。この意味で、衛星によるモニタリングや、瀬戸内海を高頻度で航行するフェリーの利用によるモニタリングの結果と相互補完的に変動をとらえてゆくことが有効になると考えられる。

なお、本報告は、2000年3月に日本海洋学会沿岸海洋研究部会主催のシンポジウム「沿岸、内湾域における長期モニタリングの方向性」において発表され、同部会により発行される「沿岸海洋研究」に掲載される論文（武岡ら,2001[13]）の内容と図をもとにして構成したものであ

る。

参考文献

1)藤原建紀・宇野奈津子・多田光男・中辻啓二・笠井亮秀・坂本亘(1997)：外洋から瀬戸内海に流入する窒素・リンの負荷量．海岸工学論文集、44、1061-1065.

2)Kaneda, A., H. Takeoka, E. Nagaura and Y. Koizumi: Periodic intrusion of cold water from the Pacific Ocean into the bottom layer of the Bungo Channel, Japan. (submitted to JO).

3)小泉喜嗣(1999)：豊後水道東岸域における急潮と植物プランクトンの増殖機構に関する研究．東京大学大学院農学生命科学研究科博士論文．145pp.

4)Takeoka, H., Y. Koizumi and A .Kaneda(2000): Year-to-year variation of a kyucho and a bottom intrusion in the Bungo Channel, Japan. p.197-215, In, Interactions between Estuaries, Coastal Seas and Shelf Seas, ed. T.Yanagi, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo.

5)Takeoka, H., A. Kaneda and H. Anami(1997): Tidal fronts induced by horizontal contrast of vertical mixing efficiency. J. Oceanogr., 53, 563-570.

6)西村芳夫・武岡英隆(1999)：豊後水道沿岸域の小規模渦．沿岸海洋研究、37、41-47.

7)小泉喜嗣(1991)：急潮時の下波湾における海水交換過程．沿岸海洋研究ノート、29、82-89.

8 小泉喜嗣(1998)：沿岸の植物プランクトンの中期変動．月刊海洋、30、419-423.

9)Kimoto, T. (1995): Development of high resolution time/space monitoring in the environment, Trans. Res. Inst. OceanoChemistry, 8, 108-117.

10)紀本岳志(1997): 海洋変化の高密度連続観測システム．ぶんせき, No.4, 285-293.

11)Kusakabe,M., N. Takatsu, T. Kimoto and H. Mikasa(1999): Conceptional design of an autonomous Biogeochemical Monitoring Platform, Proceedings of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference, 596-602.

12)Harashima,A., R.Tsuda, Y.Tanaka, T.Kimoto and H.Tatsuta and K.Furusawa(1997): Monitoring algal blooms and related biogeochemical changes with a flow-through systen deployed on ferries in the adjacent seas of Japan,in Kahru, M. et al.(ed.)Monitoring Algal Blooms, 85-112, Springer.

13)武岡英隆，速水祐一，兼田淳史，松下太郎，紀本岳志，渡辺浩三，藤川淳一(2001)： 瀬戸内海の栄養塩環境の長期自動モニタリング，沿岸海洋研究、(印刷中).

Comprehensive monitoring of the Seto Inland Sea to detect the global change

***Hidetaka TAKEOKA**

***Center for Marine Environmental Studies (CMES), Ehime University**

Abstract: It has been revealed that time-dependent density currents in the boundary between the Seto Inland Sea and the Pacific Ocean reflects the global scale oceanographical change and that nutrients are conveyed by these density current from the lower layer of the Pacific Ocean to the inside of the Seto Inland Sea.To detect such changes, CMES of Ehime University constructed a station at Sata Peninlular, which locates between the Pacific and the Inland Sea, to monitor the biogeochemical components such as nutrients. It will be feasible to construct a comprehensive scheme by integrating the time-series monitoring at the fixed station and the temporal/spatial monitoring by ferries to detect the global change and its effect to the Inland Sea.

Keywords: global change, Seto Inland Sea, nutrients, long-term time series, monitoring station