

B－9 太平洋域の人為起源二酸化炭素の海洋吸収量解明に関する研究

(3) 海洋生物データのデータ統合化技術と炭素循環解明への活用に関する研究

独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所

海洋生産部 物質循環研究室 塩本明弘

独立行政法人水産総合研究センター北海道区水産研究所

亜寒帯海洋環境部 生物環境研究室 小埜恒夫

研究協力者

独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所

生産環境部 樽谷賢治

財団法人日本水路協会海洋情報研究センター 小熊幸子

北海道大学院地球環境科学研究院 碓井敏宏

東海大学海洋学部 田所和明

平成13～17年度合計予算額 41,711千円

(平成17年度予算額 7,938千円)

※ 上記予算額には、間接経費 9,630千円 を含む)

〔要旨〕 海洋における二酸化炭素の時空間分布の変動を解析するため、水産総合研究センター所属の調査船で得られた栄養塩とクロロフィルaのデータを収集し、クオリティーコントロールを行った後にデータベース化し、中央水産研究所のホームページにおいて公開した。

まず、このデータベースを用いて、親潮域における1998年のレジームシフトの検出を試み、その検出に成功した。

次に、このデータベースにJODC、気象庁等の既存データを加え、1960～2002年の北太平洋亜寒帯域(親潮域)におけるリン酸塩の長期変動と炭素循環への影響について解析を行った。その結果、北太平洋亜寒帯域の表層と中層に同位相のリン酸塩濃度の周期的変動が検出された。また、リン酸塩濃度に表層では減少、中層では増加という長期的な傾向が認められた。黒潮域においても表層ではリン酸塩濃度に長期的減少傾向が見られた。これらの変動については炭素循環への影響に関する解析においては、これまでとは異なる新たな仮説が必要であると考えられた。

〔キーワード〕 データベース、栄養塩、周期的変動、長期的傾向、炭素循環

1. はじめに

海洋表層の二酸化炭素分布に影響を与える全炭酸分布は、鉛直循環による下層からの供給に加えて植物プランクトンによる吸収によって大きく影響を受ける。植物プランクトンの現存量はクロロフィルa(Chl-a)によって把握され、植物プランクトンの光合成による全炭酸の吸収は栄養塩分布に反映される。また、中深層の栄養塩は人為起源二酸化炭素の蓄積量を推定する上で必要なパラメータである。従って、海洋表層の栄養塩とChl-aおよび

中深層の栄養塩について、時間的にも空間的にも豊富なデータセットが揃うことにより、海洋における二酸化炭素分圧の分布はもとより、季節や年による変動、海域や深さによる変動の要因を解析することが可能となる。

2. 研究目的

これまで水産総合研究センター（水研センター）の調査航海において得られた北太平洋における栄養塩やChl-aデータを収集し、クオリティーコントロールを行った後データベース化し、中央水産研究所のホームページで公開して内外の炭素循環研究に資することが第一の目的である。作成したデータベースを基に、他の研究機関が公開しているデータベースをも合せて、表層と中層における栄養塩濃度の時間的、空間的変動を解析し、北太平洋における炭素循環への潜在的影響を明らかにしていくことが第二の目的である。このため、まず、日本周辺域を幾つかの海域に分け、各海域における栄養塩濃度の周年変動パターンについて気候値を求める。そして、この気候値に対する個々の観測値のばらつきの程度を統計学的に評価し、各海域・時期によって任意の精度で時空間変動を明らかにするために必要なデータ数を割り出す。さらに、親潮域と黒潮域において表層と中層でのリン酸塩濃度の長期的変動を解析し、周期性や長期的傾向を検出する。

3. 研究方法

3（1）データベース作成と公開

水研センター及び水産庁には12隻の調査船が配属されていて、主として日本の経済水域内で資源、海洋、増殖のための調査研究に従事している。栄養塩とChl-aの調査を行っているのは主として海洋調査においてである。そこで、各水産研究所の海洋調査担当者に文書によって、最近の調査結果において得られた栄養塩とChl-aデータ並びに同じ調査で得られた水温や塩分等のデータの提供を依頼した。依頼に応じて集まったデータをまず整理し、次いでクオリティーコントロールを行った後データベース化し、中央水研のホームページにおいて2004年2月27日に公開を開始した。これらの作業には、そのノウハウを有している日本水路協会の海洋情報センター（MIRC）からの甚大なる協力を得た。

クオリティーコントロールの概要は次のとおりである（詳細は小熊・碓井，2004）。その基本は大量データに対する品質管理チェックで、そのチェック項目は、年月日・時刻、緯度経度、船舶コード、重複、船速、海陸、観測深度、レンジ、プロファイルの連続性・鉛直勾配、密度逆転、項目間プロット、鉛直プロファイルである。とくに最後の2つの項目が本データベース作成に重要と考えられる。項目間プロットチェックとは、ある化学成分と別の化学成分との間に一定の関係が見られることを用いたエラーの検出である。また、鉛直プロファイルチェックは、例えば、ある化学成分について、一航海で得られたすべてのデータの鉛直プロファイルを同一の図に示して比較・検討してエラーを検出する方法である。さらに、海域の特性、測定方法の違い等を考慮してより高品質なデータベースを作成した。

3（2）統合データベースの持つ潜在的なサンプリング誤差の評価手法の開発

計画的な船舶によるモニタリングがなされていなかった過去の時代の環境変動を復元する場合、

元々モニタリングとは異なる個々の目的で取得された既存データを統合化して一つのデータベースとして用いる事になる。この場合、得られたデータセットの時空間的サンプリング密度は比較的粗く、不均一である事が多い。本課題で作成した栄養塩・クロロフィルデータベースも同じ問題を抱えている。そこで、このような特徴を持つ既存データから作成したデータベースから、炭素循環研究のために有意なシグナルを引き出すための一般的手法を確立する事が必要となる。このための第一段階として、まず統合データベース中の個々のデータが潜在的に持つ「サンプリング誤差」の定量的な評価を海域毎に行う事を試みた。

作成された「栄養塩・クロロフィルデータベース」 (<http://www.nrifs.affrc.go.jp/eiyo/>にて公開中) の中から、月単位に十分な数のデータが揃っている下記の二つの海域について栄養塩データを切り出し、深さ10mの栄養塩データ(リン酸および硝酸濃度)の月平均値と標準偏差(SD)を計算した。各海域に存在する単一の栄養塩データをその月の混合層濃度の代表値として取り扱った場合(例えば時空間分解能の粗なデータセットで各月の栄養塩データが1つしか無い場合がこれに相当する)、このSDをそのデータが潜在的に持つサンプリング誤差の絶対値と考え、このデータベースから検出可能なシグナルの大きさについて様々な解析を行った。

解析を行った海域は親潮域と黒潮域であった。親潮域では、38° N以北、150° E以西の北太平洋域から100m水温が5℃以下の測点を切り出して月平均値とSDを計算した。この際、海岸から10km未満の距離にあるデータは沿岸の影響を受けているものとしてとり除いた。黒潮域では30° N-34° N、137° E-139° E間の長方形領域にある全データを切り出し、それ以上は水塊分けせずに表面水の各栄養塩濃度の1月と4月の各月平均値とSDを計算した。

3 (3) 親潮域における1998年のレジームシフトの検出

上記データベース中で最もサンプリング密度が高く、均一性も確保されている親潮域について、実際に1990年～2003年の間の経年変動が本データベースから解析可能かどうかを試みた。特に1998年以前とそれ以後で、親潮域の物理的海洋環境(水温、塩分)が不連続的に変化した事が近年明らかとなっているが、これに対応した栄養塩やクロロフィルのデータに不連続的な変化が見られるかどうかについて本データベースより検証を行った。

3 (4) リン酸塩濃度の長期変動の解析

3 (4) ①親潮域

データは水研センター、気象庁(JMA)及び日本海洋データセンター(JODC)の、1960年～2002年までのものが用いられた。水深が500m以上で、100m水温が5℃以下の調査点において得られたデータを用いた。水深が500mよりも浅い調査点では沿岸水の影響を受けている可能性があるので割愛した。データを収集した海域は36° N-45° N、141° E-152° Eの範囲内であった(図1a)。初期の調査ではナンセン採水器による標準層(0、10、20、30、50、75、100、125、150、200、250、300、400、500m)からのデータで、近年はCTDによるものである。リン酸塩はモリブデンブルー法を用いて測定された。0mを表層、北太平洋中層水の中心である密度(σ_θ) 26.8を中層とした。表層混合層は密度が表層よりも0.125kg m⁻³増加した深さまでとした。

表層、中層、混合層ともに各年・各月で平均した。グリッドデータは1958～2001年の間で月毎に標準化した。欠測データは内挿して求めた。

3 (4) ②黒潮域

日本周辺における太平洋側に位置する観測点はNGDC (National Geophysical Data Center ; <http://www.ngdc.noaa.gov/>) の0.2度グリッドの水深データを用いて、1) 沿岸域(水深<200m)、2) 陸棚斜面域(200-500m)、及び3) 沖合域(>500m) に区分した。黒潮域での解析には3) 沖合域のデータを用いた。沖合域にはさらに黒潮域(深さ200mの水温:>15℃)、黒潮内外側域(深さ200mの水温:<15℃)^{1,2)}、親潮・黒潮移行域(深さ100mの水温:5-15℃)、親潮(深さ100mの水温:<5℃)³⁾等が存在する。本研究では黒潮域(深さ200mの水温:>15℃)でのデータを用いた。黒潮域と識別されたデータを用いて、黒潮(KU; 30° N、131° E-139° E

; 伊豆海嶺以西) 及び黒潮続流(KE; 32° N-36° N、141° E-145° E) の2つの海域を対象に解析を行った(図1b)。データベースのデータのうちエラーフラグのついたものは削除した。各層データは1000mまで内挿を行い10m間隔のデータを作成した。

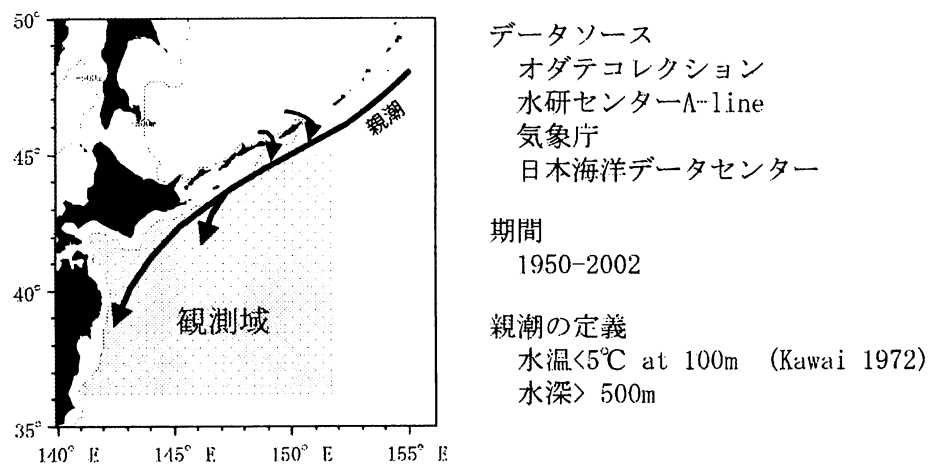


図1a 親潮域における観測域

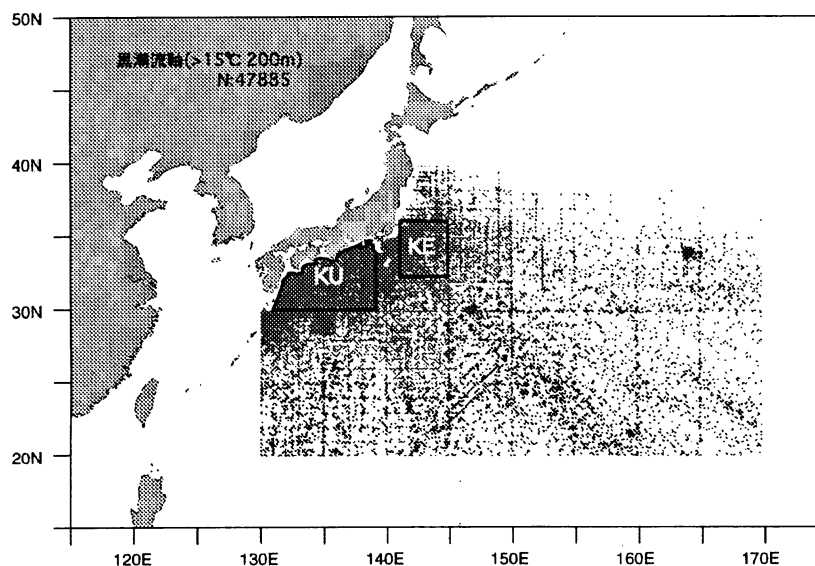


図1b 黒潮域における観測

4. 結果・考察

4 (1) データベース公開

公開されたデータベースを見るには、中央水研のホームページ(<http://ss.nrifs.affrc.go.jp>)にアクセスし、最初の画面の「データベース等」をダブルクリックし、続いて次の画面の「栄養塩・クロロフィルデータベース」をダブルクリックすると、データベースの最初のページが出てくる。データベースは4つの項目から構成されており、データは「航海情報・観測データ」の「航海情報一覧」と「観測データ一覧」に記載されている。

実際のデータはエクセルファイルとして収録されていて、「観測データ一覧」を選択した場合、航海情報・観測データの表が現われる。「データファイル」とあるカラムの中から必要な調査を選び、ファイルをダブルクリックすることにより、データが観測点と深さ別に記載されている「観測データ」の表が現われる。

本データベースに収録されているデータの海域は、太平洋岸の北海道沖から御前崎沖までのものが多く、それ以外では瀬戸内海や北太平洋中高緯度域のものがある。期間の最も長いデータセットは北海道区水産研究所のもので、1990年以来のデータが収録されている。水産工学研究所の鹿島灘のデータセットは1996年からであり、その他は最近のものである。

4 (2) データベースの持つ潜在的サンプリング誤差

親潮域における各月の混合層内のリン酸塩濃度の月平均値に対するSDは、どの月も単一の栄養塩データは潜在的に $\pm 0.01 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 以上のサンプリング誤差を持っていた。月平均濃度とSDの間には必ずしも正の相関があるとは言えず、SDは生物活動の高い4月や5月にピークを示す季節変動が見られた(図2)。最もSDの大きい4月では、SDが $0.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ にも達していた。これは標準的な分析誤差($\pm 0.01 \mu\text{mol kg}^{-1}$)よりサンプリング誤差の方が常に10–50倍以上大きい事を意味しており、この海域では少数の高精度データより大量の簡易計測データ(低精度データ)の方が、少なくとも海域の平均的な栄養塩の状態を知る上では有効である事を物語っている。

このような潜在的誤差を持つ海域において、任意の大きさのシグナルを検出するために必要な各月のデータ数(m)を、以下の式を用いて求めた。

$$m(S) = \text{Int} \{n+1 \mid SD/(n-1)0.5 = S\} \quad (1)$$

この式で、m(S)は月平均値の推定誤差がS以下になるために必要な各月の最低のデータ数を表す。Sとしてリン酸塩濃度の標準的な分析誤差より少し大きめの値である $0.04 \mu\text{mol kg}^{-1}$ とした場合の各月のmの値を求めると、各月のSDが大きくとも、冬期(1月、3月)では30–40個の観測値があれば、混合層内のリン酸濃度について分析誤差とほぼ同等の誤差レベルで、時間や空間分布についての議論が可能となることが分かった(表1)。

一方、黒潮域では、冬期(1月)、春期(4月、5月)とも月平均の混合層内のリン酸濃度のSDは $0.040 \mu\text{mol kg}^{-1}$ のオーダーであり、mは1となった(表1)。これは黒潮域の混合層においては単一の測定データをそのまま「その月・その水塊の代表値」として使用可能な事を意味している。言い変えると、黒潮域については大量のデータを収集せずとも、栄養塩の分析誤差ぎりぎりの大きさの時空間変動のシグナルを議論することが可能なことが分かった。このことは、既存

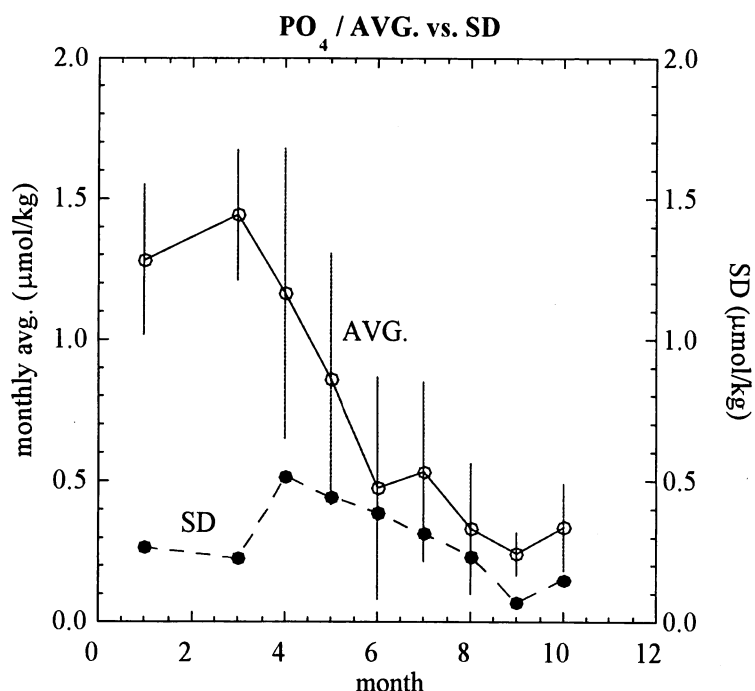


図2 親潮混合層（10m深）のリン酸月平均値とSD

表1 親潮域・黒潮域の混合層リン酸濃度月平均値（ μ ）、標準偏差(SD)、および臨界データ数m ($S=0.04 \mu \text{mol/kg}$)

親潮域	μ	SD	m
1月	1.28	0.27	45
3月	1.44	0.23	34
4月	1.16	0.52	167
5月	0.86	0.45	124
7月	0.53	0.32	64
9月	0.24	0.07	4
黒潮域			
1月	0.25	0.04	1
4、5月	0.07	0.04	1

のデータベースを用いた栄養塩分布・挙動については炭素循環の解明、さらには亜熱帯域の海洋環境モニタリング計画を立てるうえで重要な知見である。

また以上の解析から、既存の任意のデータベースについて、そこからどの程度の大きさの変動のシグナルなら有意に検出可能か、また逆にある大きさのシグナルを検出するために更にどれだけのデータを収集する必要があるかについての指標を、式（1）は我々に与えてくれる。

4（3）親潮域における1998年のレジームシフトの検出

まず、本データベースの親潮域における深さ10mのデータを切り出して、親潮域の混合層における時系列データベースを新たに作成した。

レジームシフトが起こったとされる年を境にして、1990-1997年と1998-2003年の2つの時期に

ついてそれぞれ各月の平均値を比較した。各々の時期における月ごとのデータ数は100を超え、表1のSDから、このデータセットにおけるリン酸塩濃度の月平均値の潜在的な推定誤差を求めると、最もサンプリング誤差の大きい4月でも $S=0.52/(100)^{0.5} = 0.050 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 以下となる。実際の各期間のリン酸塩濃度の月平均のSDは、この潜在的なサンプリング誤差と各期間内の混合層リン酸塩濃度の同じ月における年変動も含んでいるため、計算されたSDが $\pm 0.05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 以上の場合はその値を、 $\pm 0.05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ 以下の場合は一律に「潜在的な推定誤差」である $\pm 0.05 \mu\text{mol kg}^{-1}$ を各期間の月平均リン酸塩濃度の誤差とした。同様の手法で深さ10mの水温、塩分、硝酸塩濃度、クロロフィルa濃度についても月平均値の誤差を求め、誤差以上の変動が1998年以前とそれ以降の月平均値の間に合った場合にのみ、そのパラメータにレジームシフトのシグナルが検出されたとした。

解析の結果、水温については1998年を境に春期から夏期の有意な水温上昇、塩分については1998年を境とする有意な冬期での塩分低下と夏期での塩分上昇が認められた。また、これまでシグナルの存在が明らかでなかった生物データについても、1998年を境として3月と4月のクロロフィルa濃度の有意な増加が初めて検出された(図3)。さらに、硝酸塩濃度については冬期から春期にかけての顕著な変化は見られなかったが、夏期の濃度は1998年を境に有意に減少している事が確かめられた(図4)。これは春期クロロフィルa濃度の増大に伴って、植物プランクトンによる混合層内の硝酸塩の使用量が1998年を境に増加した事を示していると考えられる。これらの結果から、1998年を境にするレジームシフトによって、親潮水域における春季ブルーミングの早期化、大型化が起こったと考えられる。これは1998年のレジームシフトが北太平洋域の海洋生態系に影響を与えた実例を示す世界で初めての知見である。

また、これらの事から、本データベースに潜在的誤差の評価法を適用する事で、少なくとも親潮域に関しては生物・化学パラメータの時系列変動を統計的な有意性を確保しながら解析可能であることが実証された。

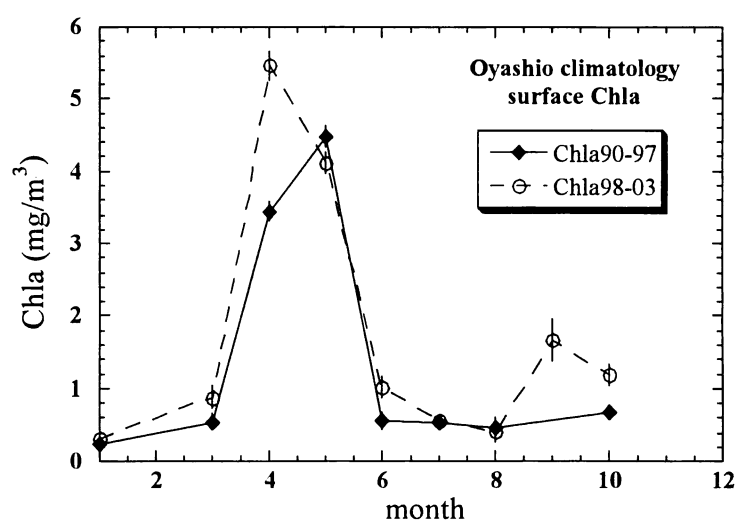


図3 混合層のクロロフィル濃度の季節変化 (1990-1997及び1998-2003)

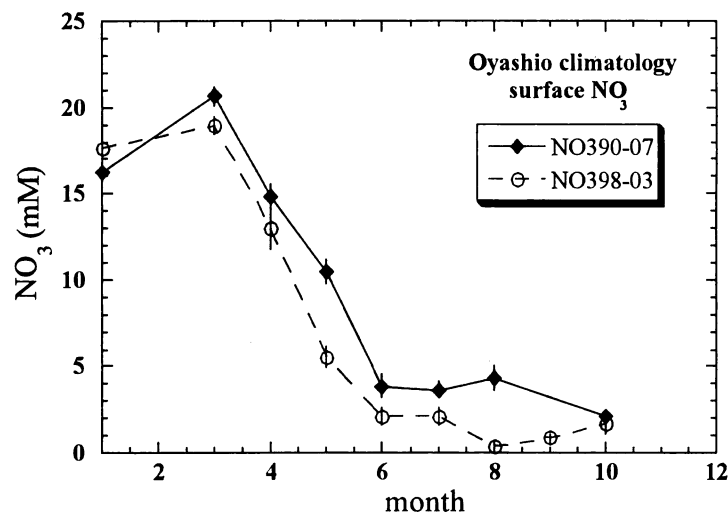


図4 混合層の硝酸塩濃度の季節変化（1990-1997及び1998-2003）

4（4）親潮域におけるリン酸塩濃度の変動

Ono et al.⁴⁾はJODCとJMAの1968年～1998年の155° E以西、36° N以北の冬季（2月）のデータを解析した。その結果、リン酸塩濃度は1965年から経時的に減少していくものの、1990年代以降には増加するという傾向が見られた。このデータに1999年以降の水研センターや1965-1968年のJMAのデータを加えて、40年に及ぶ親潮域表層の冬期におけるリン酸塩濃度の長期変動を解析した。その結果、1990年代以降の増加はみられず、長期的な傾向としては2005年まで減少することが明らかとなった（図5）。一方、中層においても40年間に及ぶリン酸塩濃度の経時変化を見ると、表層とは逆に増加する傾向が見られた（図6中）。

リン酸塩濃度は表層において低く、中層では高い。水柱の鉛直成層強度が弱くなると表層と中層の混合が不活発となると、濃度の低い表層には中層からのリン酸塩の供給が緩慢となるものの、植物プランクトンによる利用は活発である。このため、濃度はますます減少していく。これに対して、中層のリン酸塩濃度は低濃度の表層との混合が不活発となるので、増加することとなる。ただし、親潮域の表層混合層深度が浅くなる傾向はみられないので、調査海域における親潮水の起源となる水域で起こっている現象で、この現象が波及してきているだけかもしれない。

上記の長期的傾向を取り除いて（長期的傾向の直線をゼロとして、その上下の変化をみる）、表層と中層の長期変動をみるとおよそ20年周期の変動パターンが見られた（図6右）。さらに、表層と中層のデータをスピアマンの順位相関で比較したところ、両者に有意な正の相関関係

（ $p < 0.05$ ）が見られ、表層と中層で同位相の周期変動が検出された。水柱の鉛直混合の強度については、およそ20年周期の変動が仮説として提案されている⁵⁾。混合強度の変化であれば、表層の低濃度と中層の高濃度が混ざるため表層の濃度は高く、中層は低くなっていくはずなので、同位相ではなく、逆位相になるはずである。従来の仮説では説明できず、リン酸塩濃度の周期変動及びその炭素循環への影響の解明には新たな仮説が必要であろう。

以上のように冬期には長期にわたる傾向が見られたが、次に植物プランクトンによるブルーミングの見られる春期（5月）についての長期傾向を調べた。これには20年周期が見られたものの、

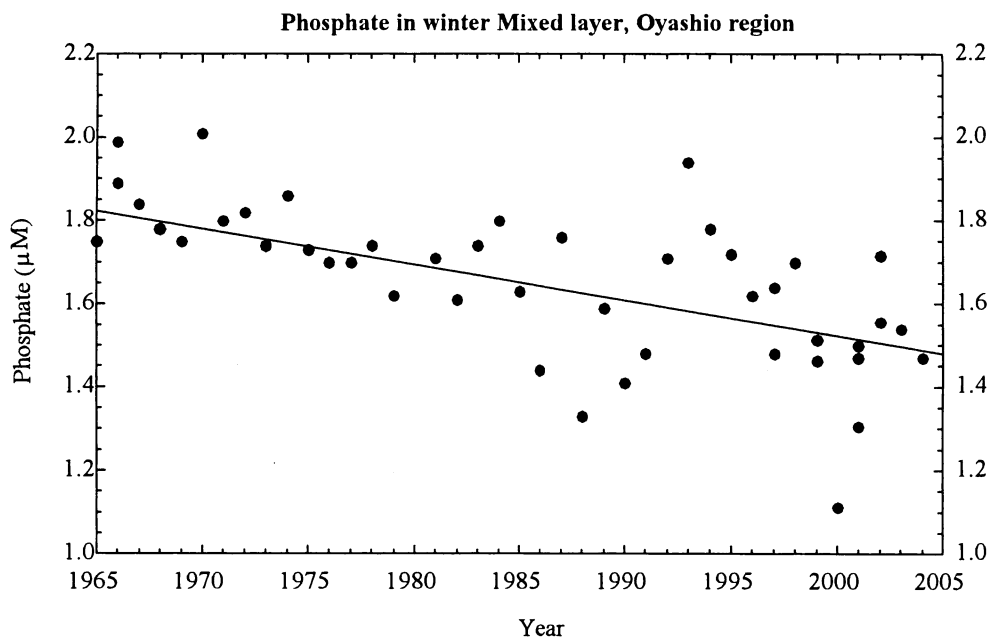


図5 冬期表層におけるリン酸塩濃度の長期的変動

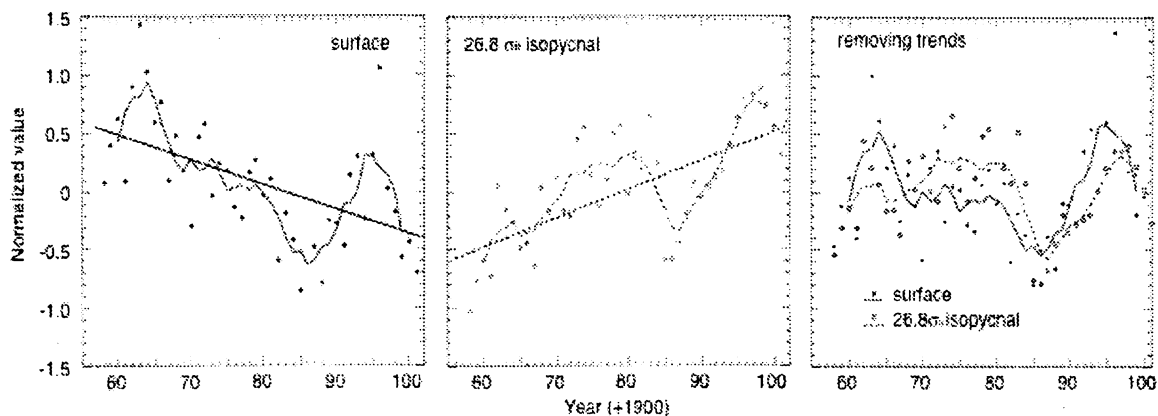


図6 表層（左）と中層（中）のリン酸塩濃度の周年変動．月別に標準化してから内挿した値の平均値．右図は長期的傾向を除いた

長期的傾向は見出せなかった（図7中）。さらに、冬期の値から春期の値を差し引いた、春期ブルーミングにより消費されたリン酸塩濃度の長期変動を調べた。その結果、直線的減少傾向と20周年変動の両方の特徴が見られた（図7下）。この春期ブルーミングに使われるリン酸塩の減少傾向は、元来鉄による制限を受けている春期ブルーミング（ブルーミング鉄制限仮説）が、下層からの鉄の供給が冬期の鉛直混合の不活発化により制限されることで減少していった結果であるかもしれない。20周年変動については、鉄制限とはまた別の仮説が必要であろう。

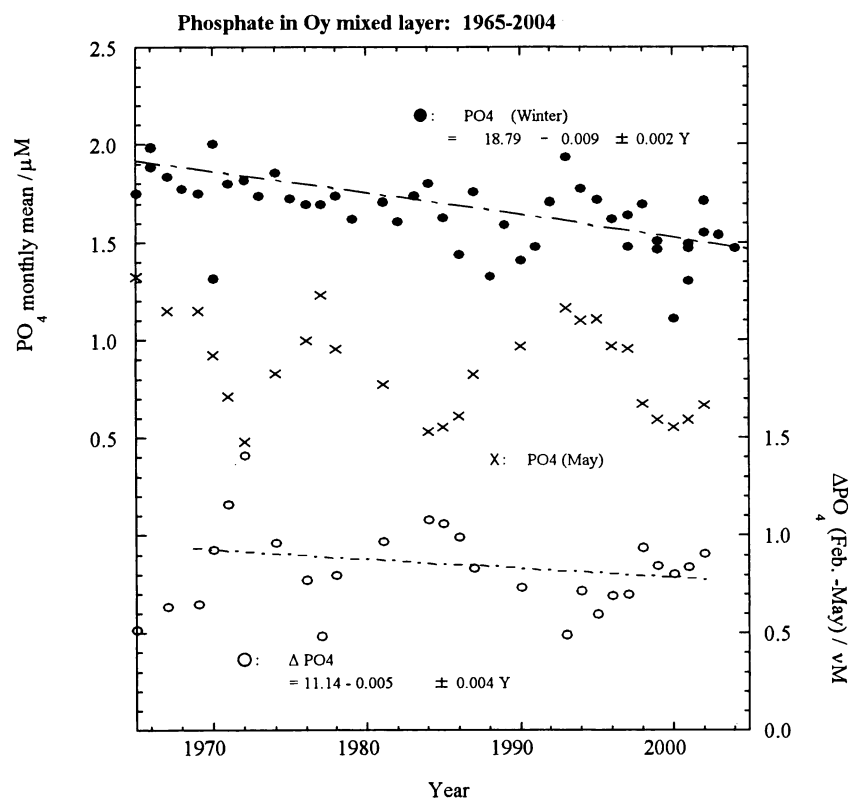


図7 冬期（上）、春期（中）のリン酸塩濃度と冬期と春期の濃度の差（下）の長期変動

4（5）黒潮域におけるリン酸塩の変動

黒潮域の解析については、WOD（World Ocean Database）（2001）の1950年～2001年のデータを用いた。黒潮流軸域（図1bのKU）と黒潮続流域（図1bのKE）を設定して、表層（10m）についての月平均の濃度分布を図8に示す。黒潮流軸域の表層においては、冬期に、水温、塩分並びに混合層の深さについて10年スケールの周期的変動が見られた。塩分については夏期においても周期的変動が見られた。リン酸塩濃度については冬期、夏期に、長期的な減少傾向が見られた。一方、黒潮続流域の表層では、冬期の塩分に黒潮流軸域と同様に周期的変動が見られた。リン酸塩濃度にも黒潮流軸域と同様に長期的な減少傾向が見られた。

次に、黒潮流軸域（図1bのKU）と黒潮続流域（図1bのKE）の中層（ $\sigma_\theta = 26.8$ ；北太平洋中層水：NPIW）について月平均のリン酸塩濃度分布を図9に示す。黒潮流軸域において、10年程度の周期的変動が見られた。黒潮続流域でも似たような周期的変動は見られるものの、そのシグナルはかなり弱い。

以上の結果から、黒潮域においても親潮域と同じように、表層のリン酸塩濃度に長期わたり減少する傾向が見られた。表層のリン酸塩濃度についての減少傾向は日本周辺海域における太平洋側の全域で起こっている現象と言える。さらに、親潮域において中層では表層とは逆に濃度は増加するという長期的傾向が見られた。親潮域での長期的傾向は黒潮域の表層には影響しているのかも知れない。一方、黒潮域の中層では長期的傾向は見られなかった。黒潮域の中層での長期的傾向が見られなかった理由については、親潮域と黒潮域との相互関係を解明するうえで重要な情報を得ることができることから、解明すべき問題のひとつである。また、黒潮域の中層で見られ

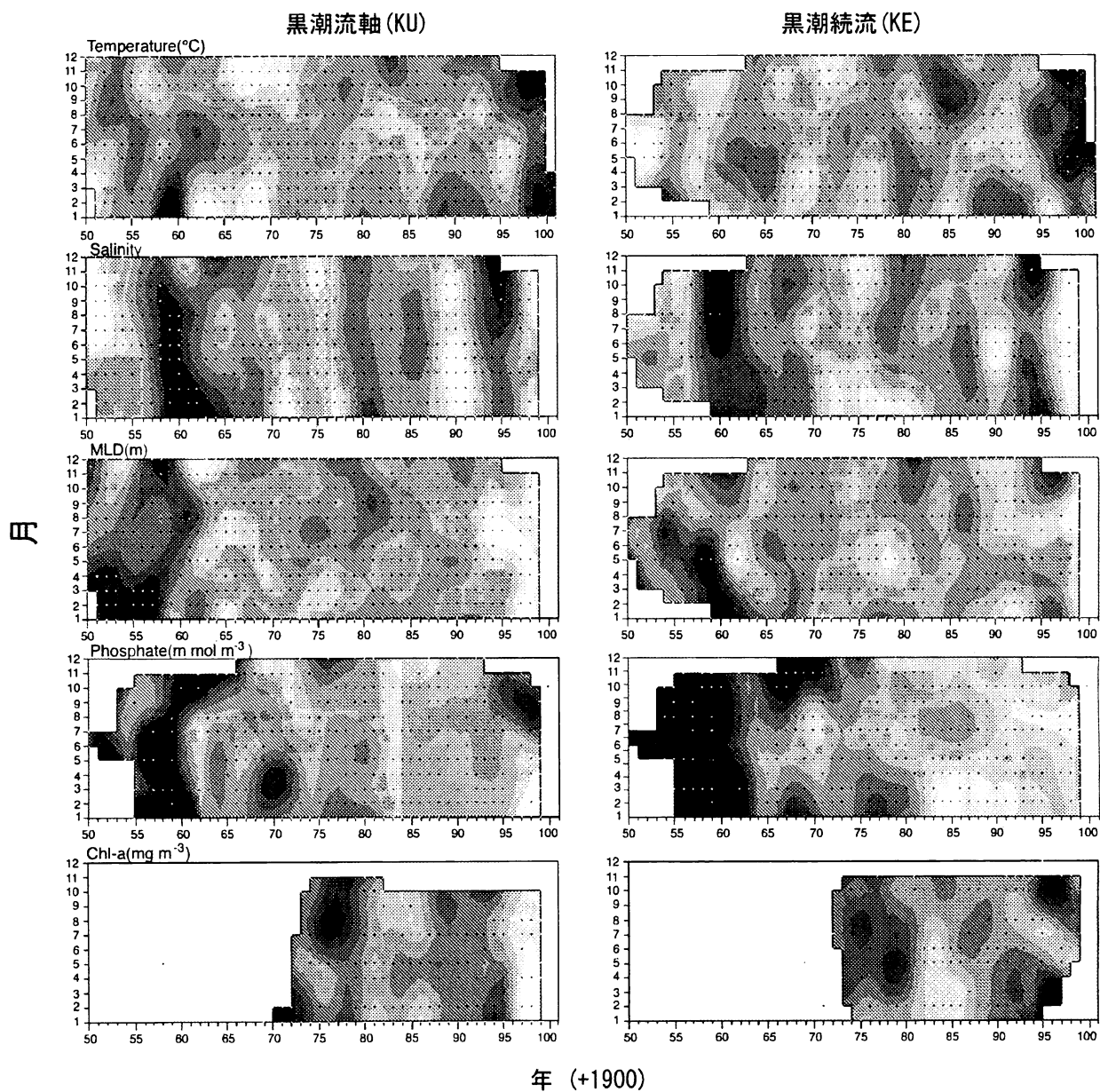


図8 黒潮流軸（左）と黒潮続流（右）における表層の水温、塩分、混合層（MLD）、リン酸塩濃度、クロロフィルa濃度の長期変動

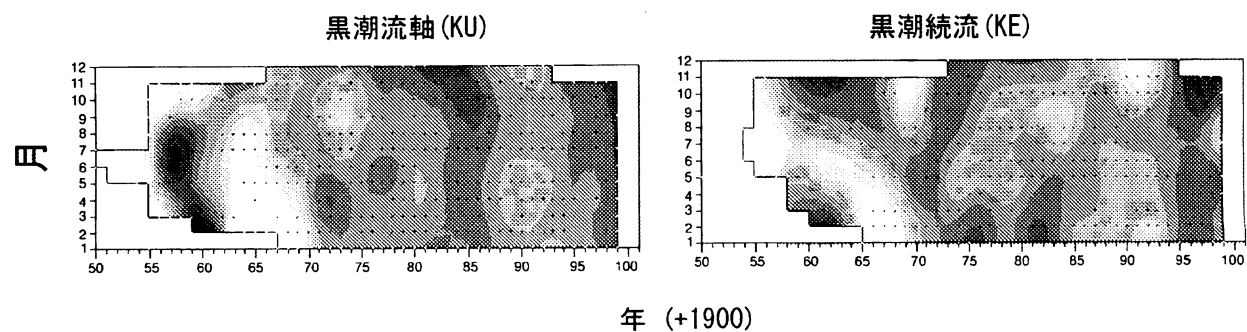


図9 黒潮流軸（左）と黒潮続流（右）における中層（ $\sigma_{\theta}=26.8$ ）のリン酸塩濃度の長期変動

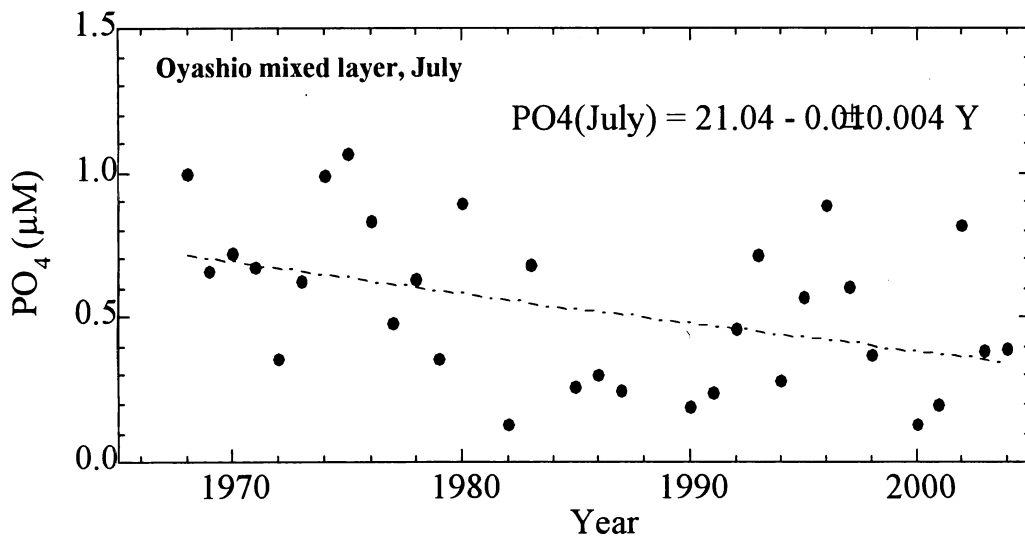


図10 夏期（7月）の親潮域（A-ライン）混合層におけるリン酸塩濃度の長期変動

た周期的な変動の原因についても明らかにしていくことが必要である。

4（6）高栄養塩・低クロロフィル（HNLC）海域の減少とその炭素循環への影響

亜寒帯域には高栄養塩で低クロロフィル（HNLC）海域が存在する（例えば、Banse and English⁶⁾）。親潮域において表層のリン酸塩濃度は長期にわたり減少する傾向が認められ（図10）、同様の傾向はDing and Saino⁷⁾により東北沖の親潮水についても報告されている。これらのことは、親潮域は現在はHNLC海域ではないものの、過去はHNLC海域であったことを示唆している。それでは、親潮域以外の北太平洋亜寒帯域におけるHNLC海域でも、濃度は過去に比べて著しく減少しているのか、あるいは現在はHNLC海域ではないが過去においてはそうであったのか。180°ライン（おしよ丸データベース）の1980年～1991年においても、OSP（Ocean Station P; 50° N, 145° W）の1970年～1991年においても、表層の栄養塩濃度は直線的に減少していることは明らかであった（図11）。以上から、北太平洋の亜寒帯全域において夏期の表層栄養塩濃度が減少していることが分かった。

そこで、現状の減少速度（年と栄養塩濃度との直線関係の勾配）から、HNLC海域が減少していく過程と、その炭素循環への影響を考察した。

WOA（2001）から40° N～60° N、140° E～120° Wの海域を切り出し、夏期（8月）の表層リン酸塩濃度が0.3 μM以上である海域のメッシュ数（1° × 1° グリッド）をHNLC海域とした（図12）。厚岸沖のA-ラインでは、硝酸塩濃度とリン酸塩濃度との間には直線関係が認められ、リン酸塩濃度に切片が見られた。この切片の値は植物プランクトンにより両栄養塩が消費されていった場合、残る栄養塩の濃度である。この切片の値は0.3 μMで、この値までは植物プランクトンによる消費の影響を受けることから、0.3 μM以上を用いた。次に、リン酸塩がOSPと同じように年間0.003 μMで減少した場合（図11、OSPの直線の勾配）と、180°ラインと同じように年間0.001 μMで減少した場合（図11、180°ラインの直線の勾配）、について50年後と100年後のHNLCに該当する海域のメッシュ数を計数し、現在のメッシュ数に対する割合（%）を求めた。年間0.003 μMで減少

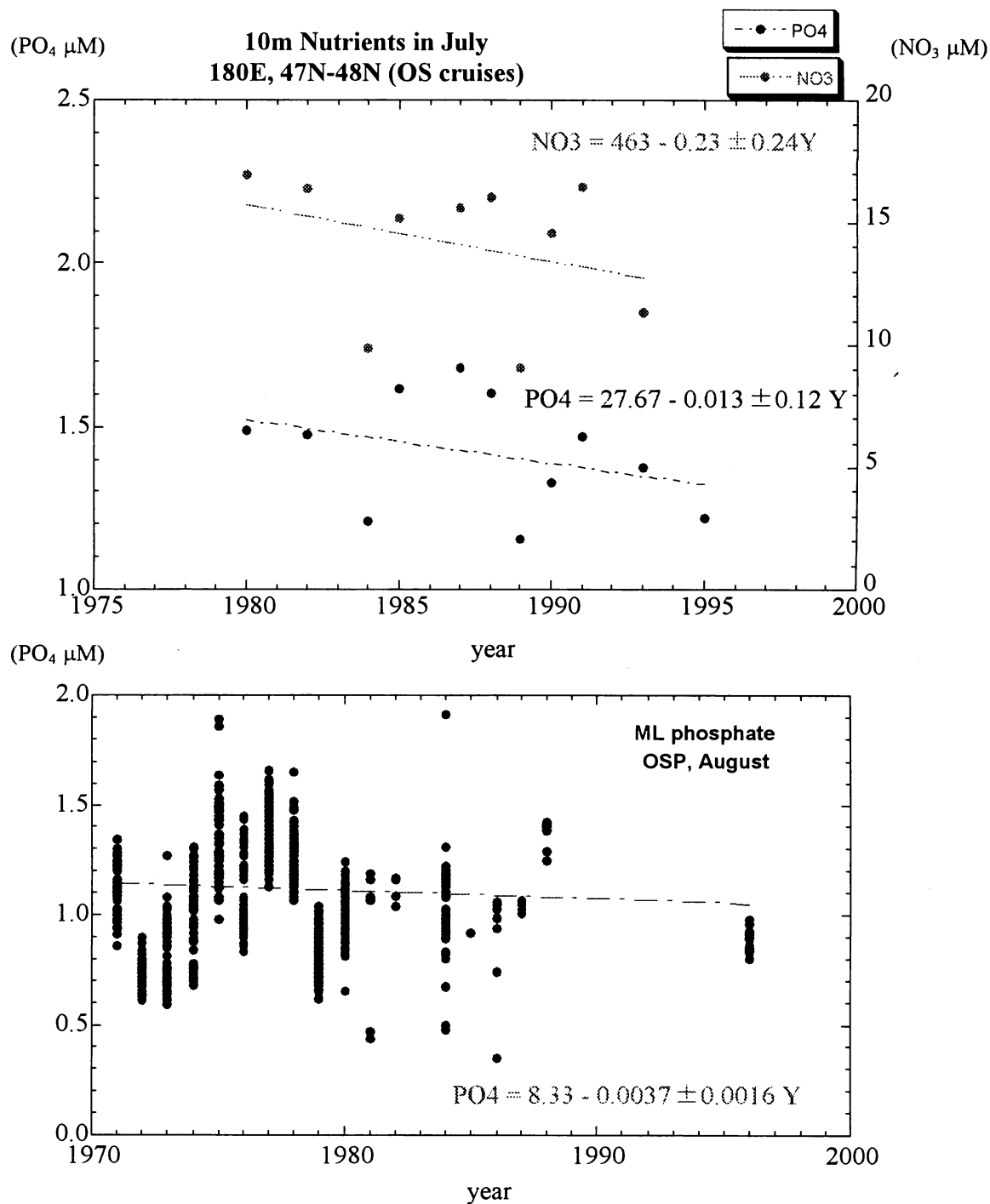


図11 夏期のおしよろ丸180° ライン（上）とオーシャンステーションP（下）の表層混合層におけるリン酸塩濃度の長期変動黒潮流軸（左）と黒潮続流（右）における表層の水温、塩分、混合層（MLD）、リン酸塩濃度、クロロフィルa濃度の長期変動

した場合には、HNLC海域は50年後には現在の90%、100年後には現在の70%となることが分かった（表2上）。また、年間 $0.001 \mu\text{M}$ で減少した場合には、HNLC海域は50年後には現在の50%、100年後には現在の20%となることが分かった（表2下）。次に、HNLC海域の夏期のリン酸塩のインベ

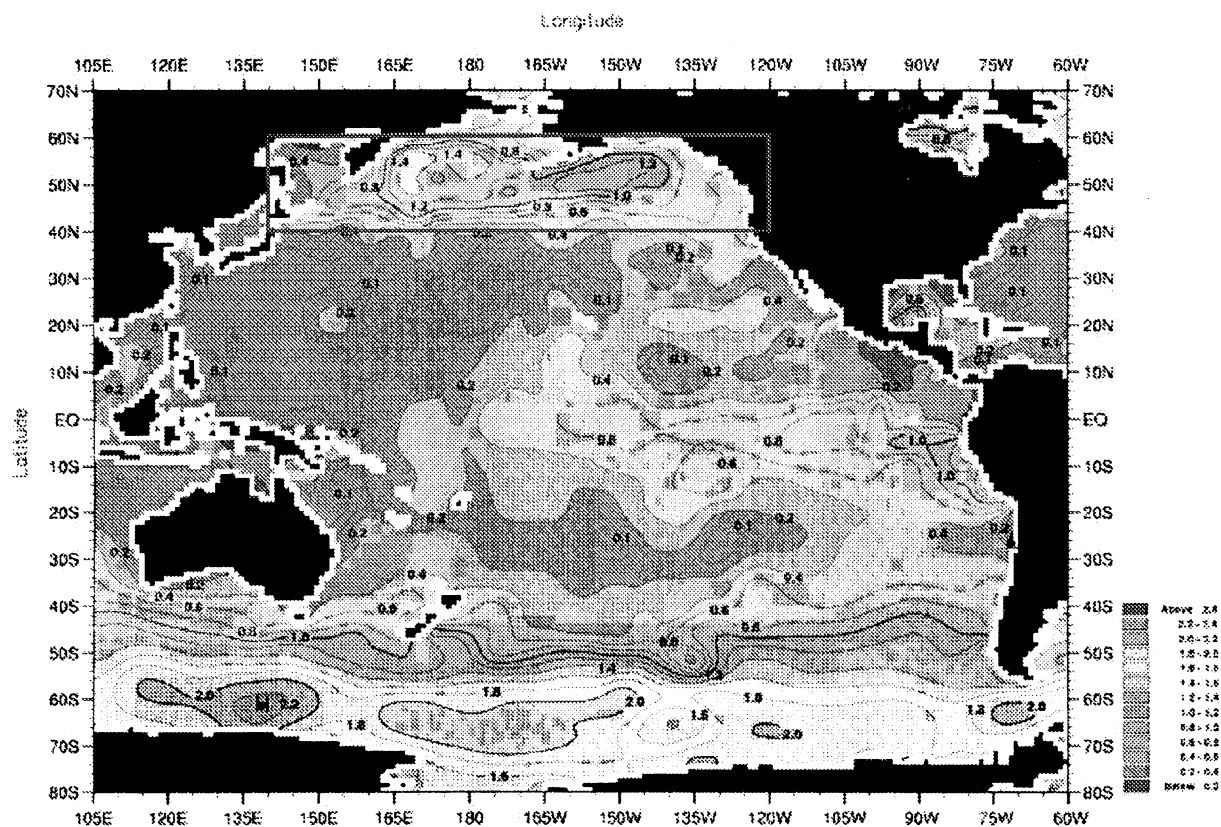


Fig. M2-1. August mean phosphate (μM) at the surface.
Minimum Value= 0.00 Maximum Value= 2.28 Contour Interval: 0.20

World Ocean Atlas 2001
Ocean Climate Laboratory/NOCC

図12 HNLC海域の減少を調べた海域（枠内）

ントリの変化を 40°N – 60°N 、 140°E – 120°W の海域、混合層を20mとして求め、そのリン酸の量を炭素量に換算した。この換算にはレッドフィールド比 ($\text{C:P}=106:1$) を用いた。その結果、年間 $0.003\mu\text{M}$ で減少した場合には、50年後には現在の80%、100年後には現在の65%に減少することが分かった（表3）。年間 $0.001\mu\text{M}$ で減少した場合には、50年後には現在の50%、100年後には現在の15%にまで減少することが分かった（表3）。これらのリン酸塩から換算した炭素量は、夏期に海洋表層に残された栄養塩が落とせる炭素量である⁸⁾ (Sarmiento et al., 1998)。すなわち、HNLC海域に残された栄養塩インベントリの減少は、HNLC海域が潜在的に持つ炭素吸収能力の減少を意味している。リン酸塩濃度の経時的減少速度が現状を維持した場合、数十年後には炭素循環に大きな影響を及ぼしうるかも知れない。

5. 本研究により得られた成果

平成13–15年度においては、水産研究所においてこれまでに得られたクロロフィルaや栄養塩のデータをデータベース化し、中央水研のホームページで公開した。平成16年度においては、データベースの有する潜在的な誤差を評価する手法を確立し、応用例として親潮域における1998年のレジームシフトの検出を試みた。その結果、レジームシフトのシグナルが有意に検出された。平成17年度においては、作成したデータベースにJODC、気象庁等の既存データを加え、1960–2002

表 2 北太平洋亜寒帯域における50年後と100年後におけるHNLC海域の割合

$\Delta P = -0.003/y$ (OSP case)					
(現在)		(50年後)		(100年後)	
PO4 conc. (uM)	該当セル数	PO4 conc. (uM)	該当セル数	PO4 conc. (uM)	該当セル数
<0.15	19	<0.15	93	<0.15	264
0.15-0.3	74	0.15-0.3	171	0.15-0.3	225
0.3-0.45	171	0.3-0.45	225	0.3<	1001
0.45-0.6	225	0.45<	1001		
0.6<	1001				
海域全体	1490				
HNLC total(0.3<)	1397	HNLC total(0.3<)	1226	HNLC total(0.3<)	1001
(%decrease)	100		88		72

$\Delta P = -0.01/y$ (180E & Oy case)					
(現在)		(50年後)		(100年後)	
PO4 conc. (uM)	該当セル数	PO4 conc. (uM)	該当セル数	PO4 conc. (uM)	該当セル数
<0.3	93	0	326	0	989
0.3-0.5	233	<0.3	455	<0.3	346
0.5-0.8	455	0.3-0.5	208	0.3<	155
0.8-1.0	208	0.5-0.8	346		
1.0-1.3	346	0.8<	155		
1.3<	155				
HNLC total(0.3<)	1397	HNLC total(0.3<)	709	HNLC total(0.3<)	155
%decrease HNLC	100	%decrease HNLC	51	%decrease HNLC	22

表 3 北太平洋亜寒帯域での50年後と100年後におけるHNLC海域減少に伴う炭素吸収量の減少の見積もり

	$\Delta P = -0.003/y$	$\Delta P = -0.01 /y$
現在	0.244	0.244
50年後	0.200	0.104
(%decrease)	82	52
100年後	0.156	0.023
(%decrease)	64	15

年の北太平洋亜寒帯域（親潮域）におけるリン酸塩の長期変動と炭素循環への影響について解析を行った。その結果、北太平洋亜寒帯域の表層と中層に同位相のリン酸塩濃度の周期的変動が検出された。また、リン酸塩濃度に表層では減少する、中層では増加するという長期的な傾向が認められた。

6. 引用文献

- 1) Nakata, K., A. Hada, et al. (1994). "Variations in food abundance for Japanese sardine larvae related to the Kuroshio meander." *Fish. Oceanogr.* 3: 39-49.
- 2) Nakata, K. and S. Koyama (2003). "Interannual changes of the winter to early spring biomass and composition of mesozooplankton in the Kuroshio region in relation to climatic factors." *J. Oceanogr.* 59: 225-234.
- 3) Kawai, H. (1972): Hydrography of the Kuroshio extension, in *Kuroshio: physical aspects of the Japan Current*, ed., edited by H. Stonmel and K. Yoshida, pp.235-352, Univ. of Washington Press., Seattle.
- 4) Ono, T., K. Tadokoro, T. Midorikawa, J. Nishioka and T. Saino (2002): Multi-decadal decrease of net community production in western subarctic North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2001GL014332.
- 5) Yasuda, I., S. Osafune and H. Tatebe (2006): Possible explanation linking 18.6-year period nodal total cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 33, 10.1029/2005GL025237.
- 6) Banse, K., and D. C. English (1999): Comparing phytoplankton seasonality in the eastern and western subarctic Pacific and the western Bering Sea. *Prog., Oceanogr.*, 43, 255-288.
- 7) Ding, L.-J. and T. Saino (1999): Seasonal and long-term interannual variations of biological environments in Oyashio surface waters off Tohoku prefecture, Japan., in *Proceedings of 1999 Spring Meeting of the Oceanographic Society of Japan*, pp.156, Oceanographic Society of Japan, Tokyo.
- 8) Sarmiento, J. L., T. M. C. Hughes, R. J. Stouffer and S. Manabe (1998): Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming. *Nature*, 393, 245-249.

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はなし。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

< 学術雑誌 (査読有り) >

- ① Chiba, S., T. Ono, K. Tadokoro, T. Midorikawa and T. Saino (2004): Increased stratification and decreased lower trophic productivity in the Oyashio region of the North Pacific - a 30-year retrospective study -. *J. Oceanogr.*, 60, 149-162.
- ② Ono, T., H. Kasai, T. Midorikawa, Y. Takatani, K. Saito, M. Ishii, Y. W. Watanabe and K. Sasaki (2005): Seasonal and interannual variation of DIC in the Oyashio mixed layer: A climatological view. *J. Oceanogr.*, 61, 1075-1088.
- ③ Sarma, V. V. S. S., T. Saino, K. Sasaoka, T. Ono, M. Ishii, H. Y. Inoue and K. Matsumoto (2006): Basin-scale pCO₂ distribution using satellite SST, Chl_a and climatological salinity in the North Pacific in Spring and Summer. *Global Biogeochem. Cycles*, (in press.)

< 学術雑誌（査読なし） >

- ①小埜恒夫 (2004): 北太平洋の気候変動と炭素循環に関する研究. 海の研究, 13, 347-356.

< 報告書類等 >

- ①小熊幸子、碓井敏宏(2004):海洋二酸化炭素関連物質データ品質管理ガイド.JODCマニュアル&ガイドシリーズNo.9, pp.130

(2) 口頭発表

- ①Kasai, H. and T. Ono: XIII PICES Annual Meeting, Honolulu, p.222. (2004): Variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Oyashio water: An analysis from the "A-line" oceanographic database.
- ②葛西広海、小埜恒夫: 2004年度日本海洋学会秋季大会(2004)
「親潮水域の低次生産環境の長期変動: Aラインデータベースからの解析」
- ③Kasai, H. and T. Ono(2004): Variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Oyashio water: An analysis from the "A-line" oceanographic database. proceedings in XIII PICES Annual Meeting, Honolulu, p.222.
- ④小埜恒夫、塩本明弘: 2005年度日本海洋学会春季大会 (2005)
「単一観測による化学データの時空間代表性について」
- ⑤佐々木克之、小埜恒夫、碓井敏宏、田所和明 (2005) : データベースを活用した三陸混合域の新生産量の推定、2005年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集、210.
- ⑥渡辺W.豊、中野善之、吉成浩志、坂本愛、笠松伸江、緑川貴、小埜恒夫(2005): 北太平洋のジメチルサルファイド (DMS) 表層濃度の復元とその時系列解析の試み、2005年度日本海洋学会春季大会、東京、
- ⑦小埜恒夫、田所和明、高谷祐介、緑川貴、塩本明弘 (2006) : 冬期・春期の親潮混合層リン酸塩濃度の長期変動: 1965年-2004年、2006年度日本海洋学会春季大会講演要旨集、153.

(3) 一般への公表・報道等

- ①水産総合研究センター中央水産研究所ホームページ「栄養塩・クロロフィルデータベース」 <http://www.nrifs.affrc.go.jp/eiyo/>

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

今後、データの更新を行いつつ、中央水研ホームページ上でのデータ公開を継続し、また成果の広報、普及に努めることにより、地球環境研究者への幅広い情報提供を行う。

また本年度に確立されたデータ解析手法を用いて、本データベースに限らず既存の離散的データベースから海洋生物環境の時系列変化を抽出する事により、日本近海における近年の海洋生態系の変動の全体像とその炭素循環への影響の把握を行い、各種の海洋施策および地球環境政策に貢献する。