

D-3 アジア大陸隣接海域の生態系変動の検知と陸域影響抽出に関する研究

(2) 衛星画像による陸域負荷物質の海洋生態系への影響評価

② 対馬暖流域におけるクロロフィル、植物プランクトン分布の変動に関する研究

研究代表者 水産庁日本海区水産研究所
日本海海洋環境部海洋動態研究室 平井 光行

水産庁日本海区水産研究所

日本海海洋環境部 海洋動態研究室 長田 宏*・山田東也・渡邊達郎・市橋正子
生物生産研究室 平川和正**

*現在 水産庁西海区水産研究所 東シナ海海洋環境部 生物生産研究室

**現在 水産庁養殖研究所 環境管理部

平成8-10年度合計予算額 6,156千円
(平成10年度予算額 2,033千円)

[要旨] アジア大陸起源の陸域負荷物質としての富栄養水の日本海への流入実態を明らかにし、陸域負荷物質の流入に対する植物プランクトン現存量の応答を明らかにするために、SeaWiFSデータおよび夏季の海洋観測結果を用いて、対馬海峡～山陰西部におけるクロロフィル-aの分布特性を海洋構造と対応づけて検討した。その結果、日本海ではクロロフィル-a濃度が高い海域は対馬海峡付近に限られており、クロロフィル-a濃度は対馬海峡東水道よりも西水道で高く、高いクロロフィル-a濃度が観測された海域は、30 psu以下の低い塩分値が観測された海域とほぼ一致する。さらに、夏季の日本海西部海域において低塩・高クロロフィル-a濃度の大陸起源水と高塩・低クロロフィル-a濃度の日本海表層水が混在し、塩分とクロロフィル-a濃度によって水塊区分が可能であった。このクロロフィル-a高濃度水は、東シナ海に供給された陸域負荷物質としての栄養塩が速やかに植物プランクトンに利用された結果として、クロロフィル-aの高濃度水が対馬海峡付近まで及んでいたものと考えられた。また、高クロロフィル-a濃度域を構成する主要な植物プランクトンは *Leptocylindrus mediterraneus*、*Guinardia flaccida*、*Rhizosolenia alata*、*Chaetoceros compressum*、*Nitzschia pungens* であり、種組成が比較的単純であった。今後、国際共同体制を確立して東西両水道から日本海に流入する対馬海流第2、3分枝および朝鮮半島沿岸からの流入水をモニターする体制の確立が必要であると考えられた。

[キーワード] 海洋構造、クロロフィル、水色、栄養塩、種組成

1. 序

対馬海流域における透明度の経年変動を調べた結果、1960年代から現在までの約30年間に数m低下している海域が多いことが明らかになった。透明度はクロロフィル a 量の多寡を表す指標であることから、この事実は植物プランクトン現存量ひいては基礎生産量が増大していることを示唆しており、近年のアジア大陸における人間活動の活発化が日本海における生物生産構造に影響を与えている可能性が危惧される。この実態を明らかにするためには、対馬海流域における植物

プランクトンの分布実態と海洋構造の関係を解明するとともに、植物プランクトンの群集構造が大陸起源の陸水による物質の負荷にどのように応答しているかを明らかにする必要がある。

2. 研究目的

日本海に流入する対馬海流水の水温・塩分の季節変化パターンは安定しているが、夏の季節躍層以浅と韓国寄りの底層部では年による変動が大きい¹⁾。このうち夏の表層水は、対馬海流表層水と呼ばれ、黒潮の表層水が東シナ海の沿岸水と混合した海水であると考えられる²⁾。実際、東シナ海～日本海における表面の月平均塩分分布図³⁾をみると、いずれの季節においても長江の河口域で最も塩分が低く、7～9月には河口域を中心に低塩分域が広がり、その影響が日本海に及んでいる。本研究では、アジア大陸起源の陸域負荷物質としての富栄養水の影響を強く受けていると考えられる夏の対馬海流表層水に着目し、九州北部から日本海西部海域における海洋構造と植物プランクトン現存量との関係から、陸域負荷物質の日本海への流入実態を明らかにし、陸域負荷物質の流入に対する植物プランクトン現存量分布の応答を明らかにすることを目的とした。

3. 研究方法

東シナ海～日本海に至る広域のクロロフィル-a濃度分布を検討するために、NASAのホームページ (<http://seawifs.gsfc.nasa.gov//SEAWIFS.html>) から SeaWiFS の Full Resolution Mapped Images における Monthly 画像を使用した。また、日本海の夏季低塩分水とクロロフィル-a濃度との関係を検討するために用いた資料は、1996年8月20～27日、1997年8月31日～9月12日および1998年9月1～12日に日本海区水産研究所が漁業調査船「みずほ丸」を用いて対馬海峡から山陰海域で、CTD (SBE-9Puls) 観測、各層採水観測を行った結果である(図1)。クロロフィル-aは、200～250mlの海水をGF/Fフィルターで濾過したものをDMFで抽出し分光蛍光光度計で定量した。栄養塩は、凍結して持ち帰った試料をオートアナライザーを用いて定量した。1996年の観測では表面海水を5%グルタルアルデヒドで固定し、植物プランクトン種組成を調べた。

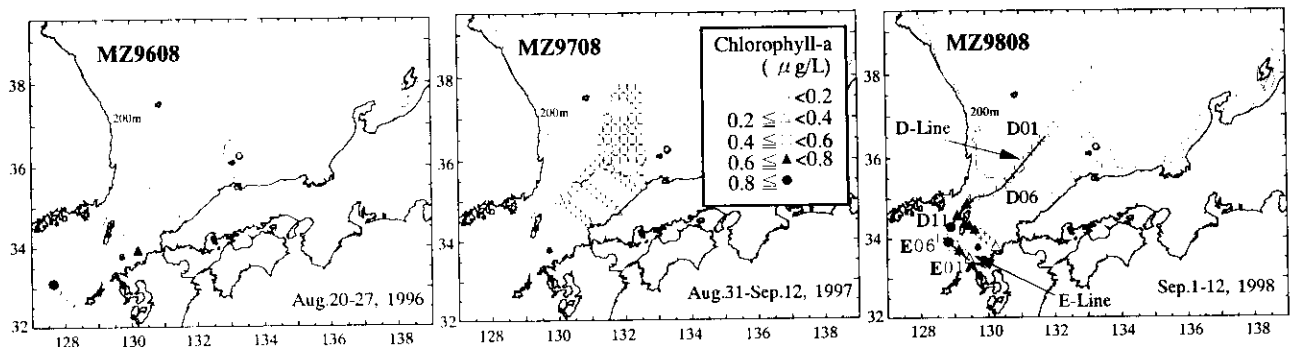


図1. 海洋観測点と表面のクロロフィル-a濃度分布

4. 結果と考察

(1) 衛星画像による東シナ海から日本海のクロロフィル-a濃度分布の特徴

東シナ海から日本海における1996年5月31日のADOS/OCTSのクロロフィル-a濃度分布を検討した。九州西岸の東シナ海から対馬海峡、日本海西部にかけての海域は広く低クロロフィル-a

濃度域となっており、朝鮮半島南岸から東岸に沿ってのみ高クロロフィル-a濃度域が認められる。このことは、クロロフィル-a濃度の高い大陸起源水が朝鮮半島沿いのごく沿岸域にのみ分布し、対馬海峡から日本海西部のほとんどの海域には、黒潮系の低クロロフィル水が分布することを示唆している。また、このクロロフィル-a濃度分布の注目すべき特徴は、朝鮮半島東岸から高クロロフィル水が帯状に東向きに流出し、さらにウツリヨウ島南方で大きく蛇行している点である。この帯状の高クロロフィル水の幅は、10~20km、蛇行の波長は100~150kmであり、この蛇行現象は、東韓暖流の渦形成過程⁴⁾と密接に関連していると考えられる。つまり朝鮮半島東岸の高クロロフィル水が、東韓暖流域に形成される暖水渦に巻き込まれて帯状に沖合に輸送され、暖水渦に沿って蛇行していると解釈できる。このような高クロロフィル-a濃度水の帯状分布については、当海域では報告例がなく、ADEOS/OCTSセンサーの分解能のよさがクロロフィル-a濃度分布の微細構造を可視化したものであると考えられる。残念ながら、ADEOS衛星は1997年6月で機能を停止したため、これ以降の水色衛星はSeaWiFSになる。

次に、SeaWiFSによる1998年6~11月の東シナ海から日本海における広域のクロロフィル-a濃度の月平均分布を図4に示す。クロロフィル-a濃度は、いずれの季節においても長江河口付近で最も高く、季節が進むにつれて高濃度域が広がっていた。日本海全体でみると、6~9月よりも10、11月にクロロフィル濃度が高く、11月には全域に高濃度域が広がっていた。長江河口域から日本海へ広がる高濃度域に着目すると、6、7月には、高濃度域は朝鮮半島南岸で留まっているのに対して、8~10月には高濃度域が帯状につながって対馬海峡に流入していた。対馬海峡付近では、九州沿岸の東水道よりも朝鮮半島沿岸の西水道側に高濃度域がみられるのが特徴である。1998年の夏~秋には、長江上流の大洪水が主因となって起きたと考えられる東シナ海~日本海の表層における低塩分現象が認められ⁵⁾、8~10月に広い海域で塩分水が広がったという事実⁶⁾と対比すると、8月以降、日本海に多量に流入したと判断される低塩分水とクロロフィルの高濃度域の広がり始める時期が一致する。しかし、11月になると低塩分域が狭くなるのに対して、クロロフィルの高濃度域はむしろ拡大している点が異なる。

SeaWiFSによるクロロフィル-a濃度の分布は、現場観測との照合が不十分であることや月平均の分布図であるため、今後、詳細な検討を加える必要がある。現段階では、SeaWiFS画像が大まかなクロロフィル-a濃度分布を示していると仮定すると、広域の日本海における低塩分水の流入とクロロフィルの高濃度域の広がり起時が一致し、対馬海峡西水道側でより塩分の低い水が分布することに対応してクロロフィルの高濃度域が認められ、さらに秋季に日本海における低塩分域が縮小してもクロロフィルの高濃度域は残るという点は、興味深い。

このように、ADOS/OCTSやSeaWiFSによる広域・同時的なクロロフィル分布を検討することによって、①クロロフィルの高濃度域が対馬海峡の西水道側から韓国沿岸域に発達し暖水渦周辺の流れに沿って帯状に伸びること、②8~10月には長江河口域から日本海へ広がる高濃度域は少なくとも対馬海峡まで帯状につながっていること、③夏の低塩分水の流入とクロロフィルの高濃度域の広がり起時が一致することなどが明らかになった。

Chlorophyll a Concentration mg/m³

0.1 0.2 0.3 0.5 1 2 3 5 10 15 20 30 50

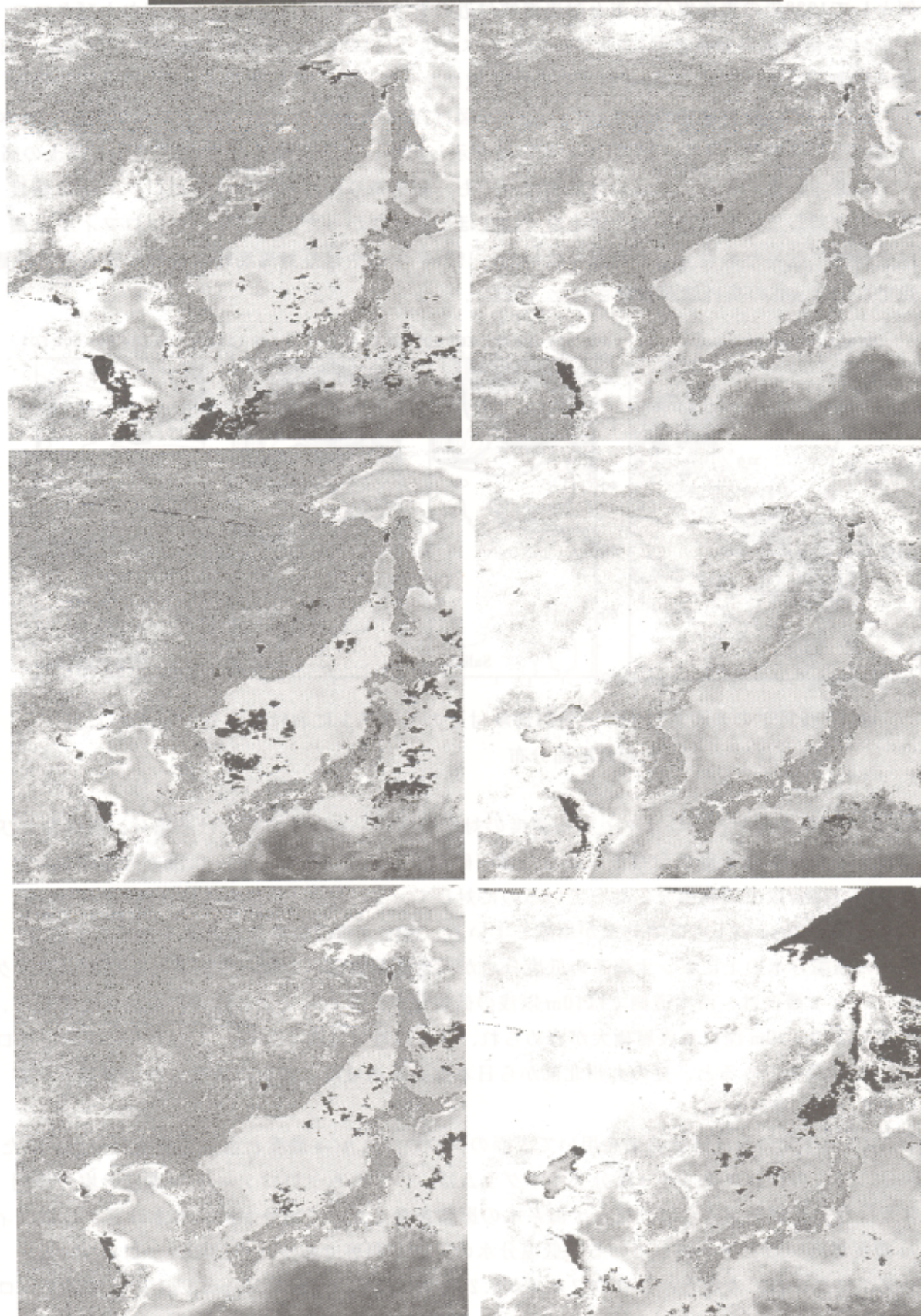


図 2. SeaWiFS による1998年6~11月の東シナ海から日本海における広域のクロロフィル-a濃度の月平均分布

(2) 夏季の日本海西部海域における海洋構造とクロロフィル分布

九州北部から日本海西部海域において1996～1998年の夏に実施した3回の海洋観測結果のうち、一例として1998年の表面塩分分布と対馬海峡付近のEラインにおける塩分、密度およびクロロフィル-aの鉛直断面分布を図3に示す。先に述べたように1998年の夏には低塩分水が発達し、日本海西部海域はほぼ全域で32psu以下の低塩分域になっていた。特に対馬海峡付近では、30psu以下の非常に低い塩分値が観測された。一方、図1に示したようにクロロフィル-a濃度は、日本海西部の広い海域では $0.2 \mu\text{g/L}$ 以下の低い値を示したが、対馬海峡付近では $0.6 \mu\text{g/L}$ 以上の高い値が観測された。さらに同じ対馬海峡付近でも、韓国寄りの西水道ではクロロフィル-a濃度が高いのに対して、九州沿岸域の西水道ではさほど高くなかった。1997年のクロロフィル-a濃度は全般的に低いため目立った特徴はないが、1996年ではやはり対馬海峡南西側の最も沖合の観測点で $1.25 \mu\text{g/L}$ の高い値が観測された(図1)。

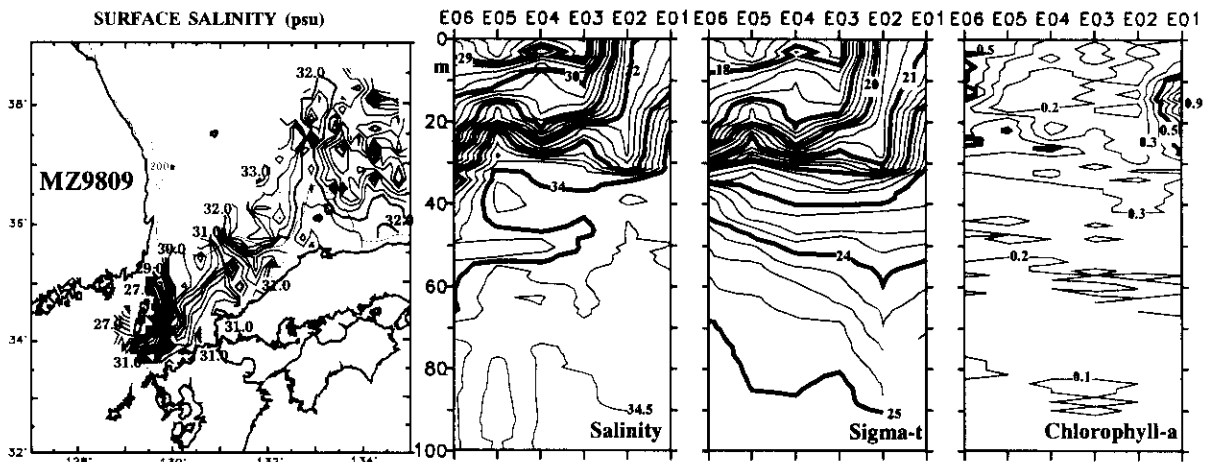


図3. 1998年の表面塩分分布と対馬海峡付近のEラインにおける塩分、密度およびクロロフィル-aの鉛直断面分布

このような海洋構造とクロロフィル-a濃度の対応関係は、Eラインにおける塩分、密度およびクロロフィル-aの鉛直断面分布をみると一層明確になる。すなわち、60m以深では沿岸から沖合まで34.25psu以上の高塩分となっているのに対して、Stn. E03付近を境に沖合側(西水道側)の10m以浅で30psu以下の低塩分水が卓越している。密度分布は塩分分布とよく対応しており、黒潮系の高塩分水の上に東シナ海系の低塩分水が西水道側に偏って覆っていることがわかる。クロロフィル-a濃度は、西水道側では10m以浅の低塩分水に対応して10m以浅で高いのに対して、沿岸側では10～20m深に亜表層極大が認められ、10m以浅では高くない。このように塩分とクロロフィル-a濃度でみると、夏の九州北部から日本海西部海域には複数の特性を持つ表層水が存在することが示唆される。

そこで、3年間の海洋観測結果を用いて表面のクロロフィル-a濃度と塩分で水塊区分を試みた(図4)。3つのクロロフィル-塩分ダイヤグラムは、いずれもクロロフィル-a濃度と塩分間に有意な負の相関が認められ、東シナ海系水の影響を強く受けて塩分が低い海水ほどクロロフィル-a濃度が高いことを示唆している。低塩分水の発達が発著であった1998年のクロロフィル-塩分ダイヤグラムによると、クロロフィルが $0.2 \mu\text{g/L}$ 以下、塩分が30 psu以上の水塊とクロロ

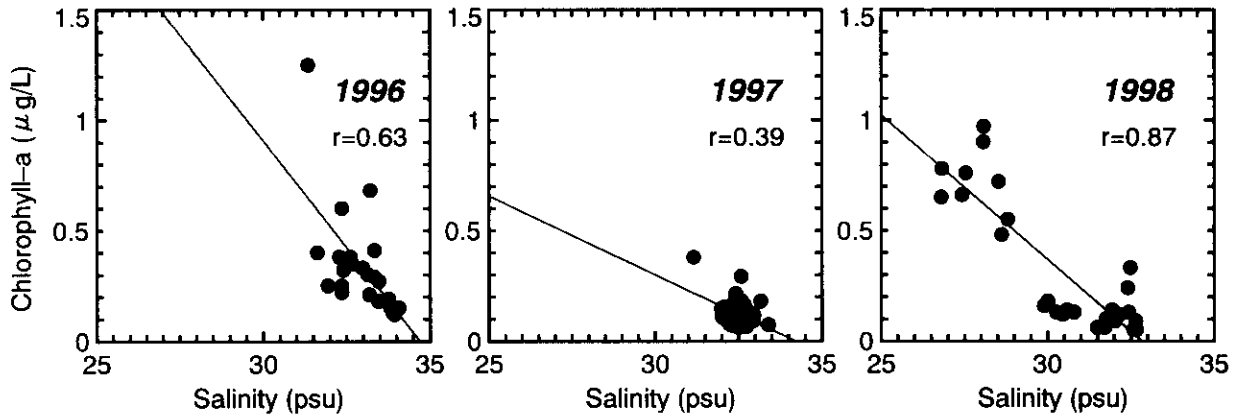


図4. 表面における塩分とクロロフィル-a濃度のダイアグラム.

フィルが $0.5 \mu\text{g/L}$ 以上、塩分が 29psu 以下の水塊の2つの水塊に明瞭に区分される。前者は、日本海西部海域に広く分布し、通常年よりは塩分が低い植物プランクトンの現存量はそれほど多くない水塊、後者は対馬海峡付近に分布する非常に塩分が低く、植物プランクトンの現存量が多い水塊とであると考えられる。先に述べた低塩分水の分布、SeaWiFS画像から得られたクロロフィル分布、およびこの水塊区分の結果から判断すると、長江起源の陸水の影響を強く受け植物プランクトンの現存量が豊富な水は、日本海においては対馬海峡付近に限られると考えられる。

これらの海洋観測結果とSeaWiFSによる広域のクロロフィル分布(図4)から得られた結果を総合すると、①日本海ではクロロフィル濃度が高い海域は対馬海峡付近に限られており、②クロロフィル濃度は対馬海峡東水道よりも西水道で高いといえる。また、③これらの高いクロロフィル濃度が観測された海域は、 30psu 以下の低い塩分値が観測された海域とほぼ一致する。さらに、④夏季の日本海西部海域において低塩・高クロロフィルの大陸起源水と高塩・低クロロフィルの日本海表層水が混在し、塩分とクロロフィルによって水塊区分が可能であるといえる。

(3) 対馬海流水中における植物プランクトン群集の種組成

1996年夏の観測地点24点で出現した主要植物プランクトンの種類数は6~26種で、細胞数は $700 \sim 30880 \text{cells/l}$ であった。出現した植物プランクトンは藍藻類、渦鞭毛藻類、珪藻類、クリプト藻類、ハプト藻類等、多岐にわたっていた。そこで植物プランクトン群集の海域による相違をみるため、多様性指数を求めた。多様性指数は九州西部の東シナ海で $1.83 \sim 3.70$ の低い値を示しているが、対馬海峡、山口沿岸、島根沿岸の順で対馬海流が日本海を北上するにつれて増大している。このことは、同じ対馬海流水であっても大陸起源の陸水の影響が強い九州西部では植物プランクトン群集の種組成が比較的単純であるのに対し、対馬海峡や山陰沿岸を通過するところには種組成が複雑になっていることを示している。さらに、北陸沿岸では多様性指数は低下しており、定線毎の平均値では最も小さい値となっている。この理由は明らかでないが、対馬暖流水中の植物プランクトンは九州西部から山陰沿岸域、さらに北陸沿岸を流れる間に種組成に大きな変化があることを示している。北河ら⁷⁾は山口沿岸から秋田沿岸までの日本海において、夏季の魚類プランクトン群集が対馬海流の流れに沿って多様性を減少させる傾向にあることを報告しており、日本

海内部では植物プランクトンについても同様の傾向がみられたことは興味深い。

次に、大陸起源の陸水の影響を強く受ける九州西部や対馬海峡におけるクロロフィル a の高濃度域の植物プランクトン群集の種組成を詳細に検討する。植物プランクトン群集の種組成が比較的単純であった九州西部海域では、他の海域に比べて珪藻類の出現種が少なく、*Leptocylindrus mediterraneus*、*Guinardia flaccida*、*Rhizosolenia alata*、*Chaetoceros compressum*、*Nitzschia pungens* の5種にとどまった。これらの多くは沿岸・暖水性種もしくはコスモポリタン種とされている⁹⁾。これらの種は日本海においても広く出現しており、特に大陸起源の陸水の影響域のみにみられるものではない。しかし他の定線ではこのほかに *Rhizosolenia*、*Bacteriastrum*、*Chaetoceros*、*Thalassionema* 属等の多くの種が出現しているのに対し、九州西岸域では珪藻は上記の5種以外はほとんど出現していない。このことは、これらの珪藻種が多く、他の種の出現が少ない海域ほど、大陸起源の陸水の影響が強い海域と判断できることを示している。

1996年夏季の観測では大陸起源の陸水の影響が強い海域における植物プランクトンの種組成は比較的単純であったが、Park(1956)⁹⁾ は1956年8月、韓国南方海域に *Chaetoceros* 属を中心とした数十種の植物プランクトンが出現していることを報告している。また Choe(1966)¹⁰⁾ は1965年8月、済州島南西の表面塩分が28.0の低塩分域に *Chaetoceros convolutus*、*Rhizosolenia hebetata semispina*、*R. alata inermis*、*R. stiliformis*、*Coscinodiscus excentricus* 等、12種類以上の植物プランクトンが出現していることを報告している。このように同じ季節であっても大陸起源の陸水の影響を指標する鍵種としての植物プランクトンは年によって異なることが考えられる。今後は東シナ海から日本海にかけての植物プランクトン種組成の変遷を明らかにする必要がある。

(4) 陸域負荷物質の流入対する植物プランクトン現存量分布の応答

これまで、海洋構造とクロロフィル -a 濃度および植物プランクトン種組成から、陸域負荷物質の日本海への流入実態を検討してきた。ここでは、さらに1998年の海洋観測で得られた、対馬海流表層水の栄養塩の鉛直分布をもとに陸域負荷物質の流入対する植物プランクトン現存量分布の応答実態を検討する。

図5に対馬海流表層水の想定される流れの方向に設定した D ラインに沿った観測点での100m 深までの塩分、クロロフィル -a 濃度およびリン酸塩濃度の鉛直分布を示す。表層低塩分水の分布が顕著な Stn. E06～Stn. D09では、クロロフィル -a 濃度は20m 以浅では表層低塩分水の分布に対応して0.5～1.2 μ g/L と高く、50m 以深では0.2 μ g/L 以下と低くなっている。一方、表層低塩分水の分布があまり明瞭ではない Stn. D04～Stn. D01では、クロロフィル -a 濃度は20m 以浅では0.2 μ g/L 以下と低く、30m～50m 深に亜表層極大を有する。さらに、これらの観測点の中間に位置する Stn. D08～D05では20～30m 深にクロロフィル -a 濃度の亜表層極大を示すことから、対馬海流表層水が日本海に流入してから北上するにつれて、クロロフィル -a 濃度が最大または極大を示す層が深くなっていくという特徴を指摘できる。また、このようなクロロフィル -a 濃度の鉛直分布の変化は表層低塩分水の分布とよく対応している。

これに対してリン酸塩の濃度は、観測点間での明瞭な差異は認められず、概ね30m 以浅では0.2 μ g-at/L 以下、100m で0.8 μ g-at/L 以上となっている。このようなリン酸塩の鉛直分布は日本海における夏の特徴¹¹⁾ と考えられ、図に示していないが硝酸塩濃度もまた30m 以浅ではほぼ検出限界以下であったことと合わせると、Stn. E06～Stn. D09のクロロフィル -a の高濃度域は高

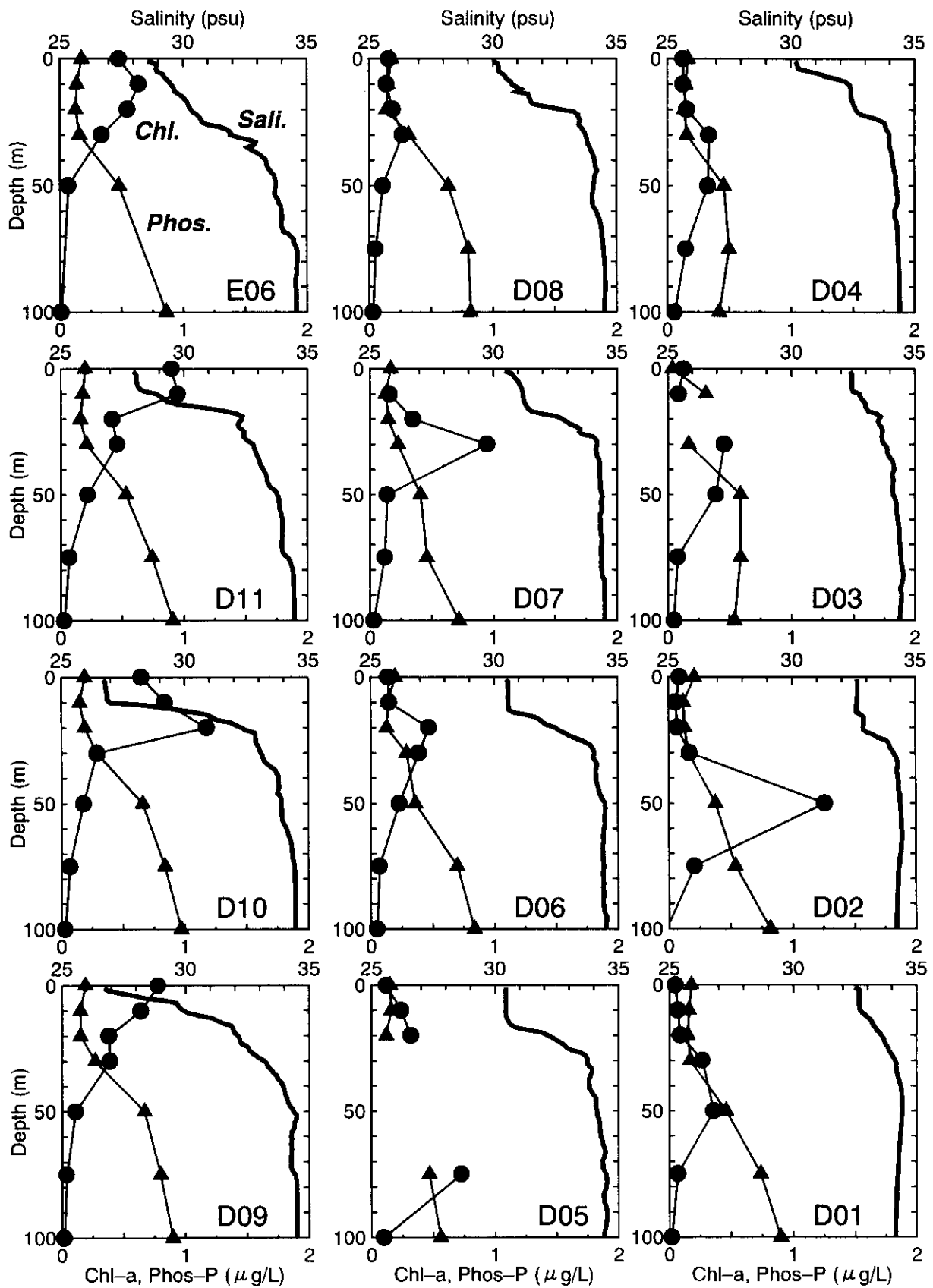


図5. Dライン (Stn. E06~D01)における塩分、クロロフィル-a濃度、リン酸塩濃度の鉛直分布.

い基礎生産性を維持しているとは考えられない。長江の河口付近では、大陸起源の陸水によって夏季に東シナ海に供給された豊富な栄養塩によって基礎生産性が極めて高く、表層のクロロフィル-a濃度が最大となる¹²⁾が、東シナ海に供給された栄養塩が速やかに植物プランクトンに利用された¹³⁾結果として、クロロフィル-aの高濃度水が対馬海峡付近まで及んでいたものと考えられる。つまり、今回観測された対馬海峡付近のクロロフィル-aの高濃度水は、水平移流によって東シナ海あるいは韓国沿岸から輸送されたものであると考えられる。

今回の結果から、陸域負荷物質として栄養塩を考える場合には、少なくとも季節躍層が形成され下層からの栄養塩供給が少ない夏季の日本海における基礎生産性を高めるということは考えにくい。しかし、気象擾乱によって鉛直混合が加速された場合や季節躍層が崩れる秋にクロロフィル-aの高濃度水が流入した場合には基礎生産性が高まることが予想されるため、今後のクロロフィル分布や栄養塩分布のモニターする体制の確立が必要であろう。また、今回の観測は、日本のEEZ内に限定されている。今回の観測結果においても対馬海峡の東水道よりも西水道側でクロロフィル-aの高濃度域が認められたこと、また東水道よりも西水道側で対馬海流の流量が大きく¹⁴⁾、大陸沿岸水の影響をより強く受けた海水が流入する²⁾ことから、国際共同体制を確立して西水道から日本海に流入する対馬海流第2、3分枝および朝鮮半島沿岸からの流入水をモニターする体制の確立が必要であると考えられる。

5. 引用文献

- 1) 小川嘉彦 (1983) 対馬海峡から日本海へ流入する海水の水温・塩分の季節変化. 水産海洋研究会報, (43), 1-8.
- 2) 宮崎道夫・阿部成雄 (1960) 対馬海流々域の水塊について. 日海誌, 16(2), 19-28.
- 3) 日本水路協会 (1978) 海洋環境図外洋編 北西太平洋Ⅱ (季節別・月別) 海洋資料センター編, 157pp.
- 4) Isoda Y. and Saitoh S. (1993) The northward intruding eddy along the east coast of Korea. J. Oceanogr., 49, 443-458.
- 5) 黒田一紀 (1999) 異常低塩分水1998の影響と情報. 日本海水産海洋研究推進レポート1998, 日本海区水産研究所日本海海洋環境部編, 23-31.
- 6) 平井光行・渡邊達郎 (1999) 1998年の日本海における夏季低塩分水とクロロフィルとの関係. 平成10年度水産庁・宇宙開発事業団共同研究成果報告書 (水産電子協会編), 61-71.
- 7) 北河康之・西川康夫・久保田正・沖山宗雄 (1995) 1984年夏季の日本海におけるサバ科魚類を中心にした魚類プランクトンの分布. 水産海洋研究, 59, 107-114.
- 8) 山路勇 (1966) 日本海洋プランクトン図鑑. 保育社, 東京, 537pp.
- 9) Park, T. S. (1956) A study on the quantity and composition of microplankton at the Southern Sea of Korea in summer, 1956. Bull. Pusan Fish. Coll., 1, 1-12.
- 10) Choe, S. (1966) Phytoplankton studies in Korean waters. I. Phytoplankton survey of the surface in the Korea strait in summer of 1965. J. Oceanol. Soc. Korea, 1, 14-21.
- 11) 馬場信夫・榎原資嗣・高谷祐吉 (1984) 日本海におけるリン酸塩の分布. 海と空, 60(3), 127-143.
- 12) Hama, T., K. H. Shin and N. Hamada (1997) Spatial variability in the primary productivity in the East

China Sea and its adjacent Waters. J. Oceanogr., 53, 41-51.

13) 渡辺康憲・皆川昌幸・阿部和雄・石樋由香 (1997) 黄海および長江沖合海域の水質環境.
1997日本海洋学会春季大会講演要旨

14) Yi, Sok-U (1966) Seasonal and secular variations of the water volume transport across the Korea Strait.
J. Oceanogr. Korea, 1(1-2), 7-13.

6. 国際共同研究等の状況

なし

7. 研究発表の状況

(1) 口頭発表

- ① 長田 宏 (1997) 日本海中央部における基礎生産量とクロロフィル a 量との関係. 1997年度日本海洋学会春季大会.
- ② 長田 宏 (1997) 現存量から生産量へ. 1997年水産海洋学会シンポジウム.
- ③ M. Hirai (1988) Marine environmental conditions from Tsushima Strait to Japan Sea. Meeting Toward Cooperative Marine Environmental Monitoring in Asian Marginal Seas, Tokyo, Japan.
- ④ 平井光行 (1998) 日本海における1998年夏・秋の低塩分現象 - 主として水平分布にみられた特徴 -. 第53回日本海海洋調査技術連絡会
- ⑤ 平井光行 (1999) 日本海における低塩分水の実態とその影響 - 主として水平分布にみられた特徴 -. 日本海ブロック水産業関係試験研究推進会議海洋環境部会
- ⑥ 平井光行・渡邊達郎 (1999) 1998年の日本海における夏季低塩分水とクロロフィルとの関係. 平成10年度水産庁・宇宙開発事業団共同研究成果報告会
- ⑦ 平井光行 (1999) 日本海における1980年代末以降の漁海況変動. 水産海洋春季シンポジウム「日本周辺海域における1980年代以降の漁海況変動のシナリオ」