

栄養塩から見た暖水塊93Aの構造の検討

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-01-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 岩田, 樹哉, 鈴木, 款 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.14945/00000359

栄養塩から見た暖水塊 93 A の構造の検討

岩田樹哉¹・鈴木 款¹

The Study of the form of Warm-Core Ring 93 A using nutrient distribution

Tatsuya IWATA¹ and Yoshimi SUZUKI¹

Abstract Nutrient distributions (NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , SiO_2) were measured in Kuroshio Warm-Core Ring (WCR) during the Hakuho-maru cruise KH-97-3.

WCR is occurring as a transit zone between the Kuroshio and Oyashio. In generally, it is thought that organic production is much greater at the edge of WCR than at the center of that. Concentration of chlorophyll-a is also higher at the edge of WCR than center of that. But, We have no clear interpretation about the mechanism of nutrient supply, especially to the edge of WCR. We had studied hydrographic of WCR structure using potential T, S, σ_θ and nutrient.

Consequently, I had gotten new hypothesis on WCR structure: The edge of WCR has lower than sea surface and mulchlayered structure from surface to bottom of WCR. This WCR structure will bring to the small scales upwelling around top of edge, which supplies nutrient to the edge of WCR, and maintains the higher organic production at the edge.

Key words: nutrient, Warm-Core Ring, TS-diagram, SiO_2 -Salinity-Diagram.

緒言

海洋の栄養塩の研究は古くから数多く行われ、現在では、海洋観測においては水温や塩分、クロロフィル-aなどと共にルーチン観測の一つにまでなっている。栄養塩の研究の成果としては全海洋における分布、栄養塩の供給量と生物生産量の関係 (MACAETHY *et al.*, 1992) など様々なことがわかっている。また、栄養塩の植物プランクトンによる取り込み速度の解明のために、¹⁵N 取り込み実験やモデル計算 (GOLDMAN & MCCARTHY, 1978; GLIBERT *et al.*, 1982) を用いたり、栄養塩の有光層内の微細構造の解明のために光ルミネッセンス法を用いる (GALSIDE, 1982)、など様々な手法が開発され、用いられ

ている。

しかし、まだ解明されていない部分も存在する。例えば、栄養塩の生物による取り込み比である。プランクトンの化学組成に関しては REDFIELD *et al.* (1963) をはじめとして多くの研究がある (BRZEZINSKI, 1985; GISMERVIK, 1997)。例えば、栄養塩の存在比が海域によって異なる (NELSON & SMITH, 1986; WILKERSON & DUGDALE, 1996) ことが、プランクトンの化学組成にどう関わってくるのか。そして、植物プランクトンの取り込み比と、プランクトンの化学組成の間の関係といったことについての検討が必要である。

また、これまで、主に物理データを用いて解析されてきた海洋構造の解明 (申・永田, 1989) に、栄養塩の分

¹静岡大学理学部地球科学教室: 422-8529 静岡市大谷 836.

¹Institute of Geosciences, Shizuoka University, 836 Oya, Shizuoka, 422-8529, Japan.

E-mail: r5744002@ms.ipc.shizuoka.ac.jp (T.I.), seysuzu@ms.ipc.shizuoka.ac.jp (Y.S.)

布をあわせて解析に用いることで、より正確、精密な水塊構造の解明に非常に有効な手段となりうるものと思われる。

以上のようなことから、本論文では、三陸沖暖水塊において栄養塩分布を用いた水塊構造の解明を目的とする。

暖水塊

暖水塊の形成過程は図1に模式的に示すように考えられている。黒潮統流は房総半島沖で蛇行しながら東に進む(図1-①)。この黒潮統流の峰の部分(東経144度、150度付近)から暖水が放出される(図1-②)。この放出された暖水は常磐沖付近で渦を形成する(図1-③)。このように形成された渦を暖水塊と呼び、暖水塊は通常北方へ移動し、三陸沖や釧路沖に存在するようになる(図1-④)(安田・奥田, 1989)。

通常、暖水塊はレンズ型の構造を持ち、その大きさは、直径100~300km、深さ500m程度で、時計周りに1週間に1廻り程度の速度で循環している高気圧性の渦であると言われている。また、暖水塊は通常1~2年程度の寿命をもつが、中には数年間にわたって存在しつづけるものもある。

これまでの暖水塊についての研究でさまざまなことが解明されてきた。前述した形成過程などもあるが、もっとも特徴的なものとして、暖水塊中心部よりも縁辺部においてクロロフィル-a濃度が高いと言うことが挙げられる(李・杉本, 1989; SMITH & BAKER, 1985; YENTSCH & PHINNEY, 1985)。暖水塊がレンズ型の構造を持つと考えた場合、暖水塊への栄養塩の供給ストリーマーと呼ばれる水平方向からの流入(図2)と水塊の境界での濃度勾配による変動にかぎられ、縁辺部における中心部よりも大きい生物生産を支えるだけの栄養塩の供給経路について説明できない。

このような状況をふまえて、暖水塊の構造について、水温、密度などと栄養塩のデータを用いて、縁辺部への

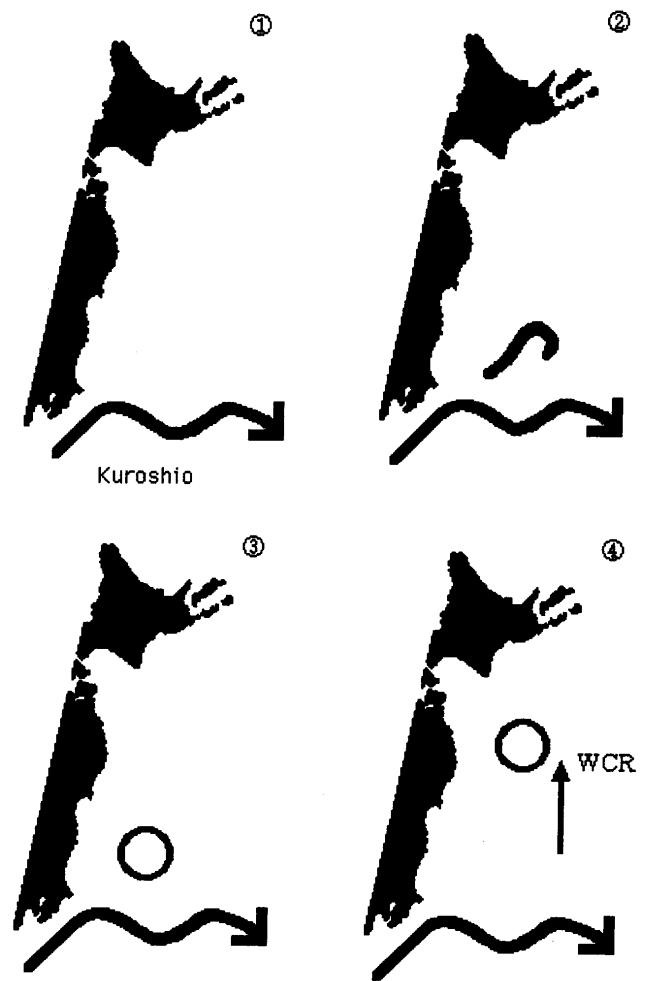


図1 暖水塊形成過程。
Fig. 1 The process to formation of Warm-Core Ring.

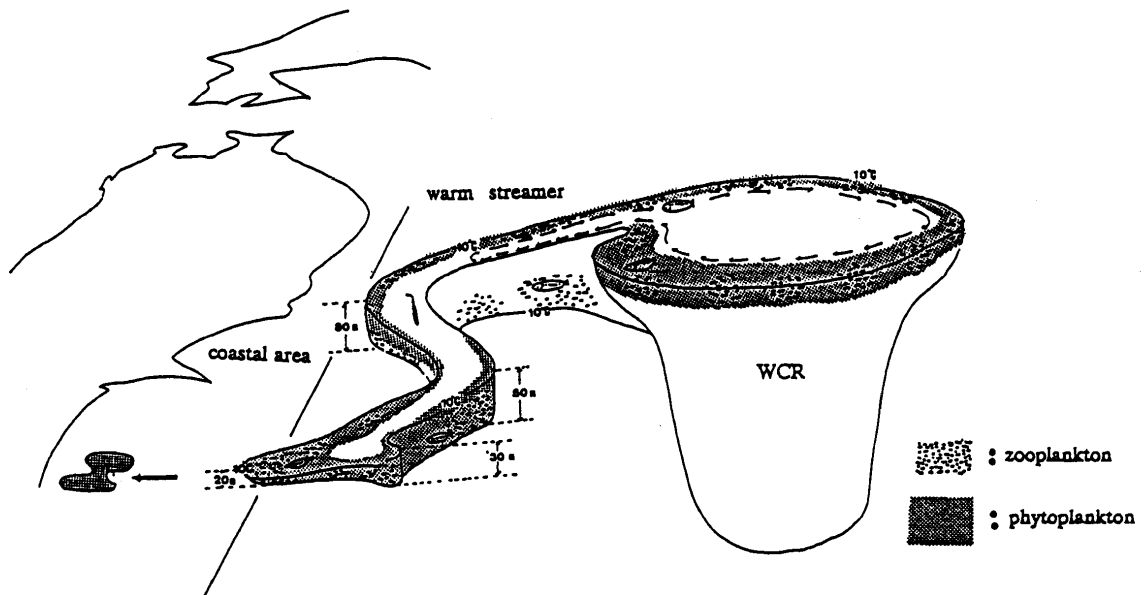


図2 これまで考えられてきた暖水塊の形状。為石(1998)より引用、一部修正。
Fig. 2 The form of Warm-Core Ring yet expected, referred and modified after TAMEISHI (1998).

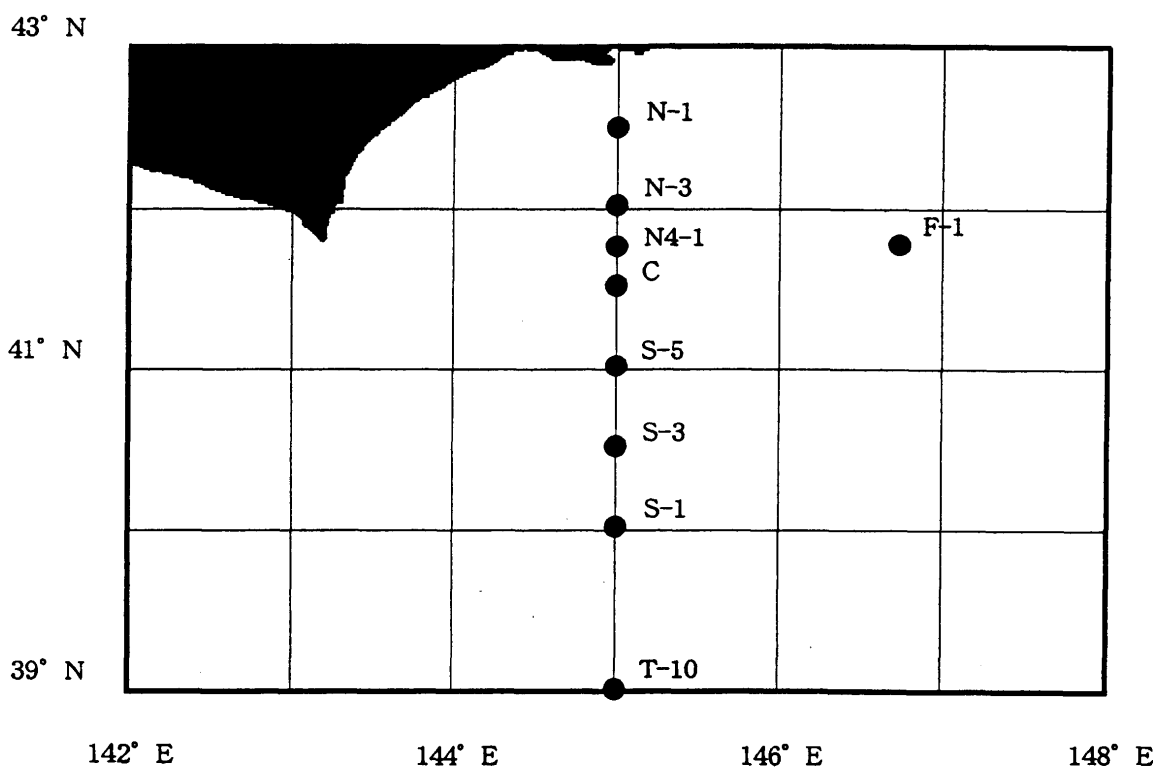


図 3 観測点.
Fig. 3 Location of the sampling stations.

栄養塩供給経路について検討した。

観測海域および分析方法

観測は東京大学海洋研究所の『白鳳丸』の1997年度第3次航海 (KH-97-3) において行われた。期間は1997年10月24日から11月11日である。以降、本航海をKH-97-3と表記する。調査を行った暖水塊は93Aと呼ばれるものである、この暖水塊93Aは1993年2月に常磐沖で発生したものであり、観測を行った1997年10月頃には北海道釧路南方沖に位置していた。観測を行った点について第3図に示す。観測はS-1からN-1までの東経145度に沿った南北断面、暖水塊内部の定点N4-1および親潮フロント域の定点F-1での定点観測、黒潮からの暖水の流入部分T-10について行った。

サンプルは、CTD-ロゼットマルチサンプラーに10Lニスキン採水器を取り付け、水深1000mまでの24層と表層の計25層について行った。ただしT-10については水深5000mまでの25層について調査している。

栄養塩の分析は船上で硝酸、亜硝酸、りん酸、けい酸について行った。測定にはALPKEM社製ザ・フローソリューションを用い、硝酸はカドミウム還元法、亜硝酸はエチレンジアミン法、りん酸とけい酸はモリブデンブルー法を用いて行っている。詳しい測定法、および装置については岩田(1996)による。なお、繰り返しの測定精度は±5%である。

結 果

図4にCTDにより得られた水温の東経145度に沿っ

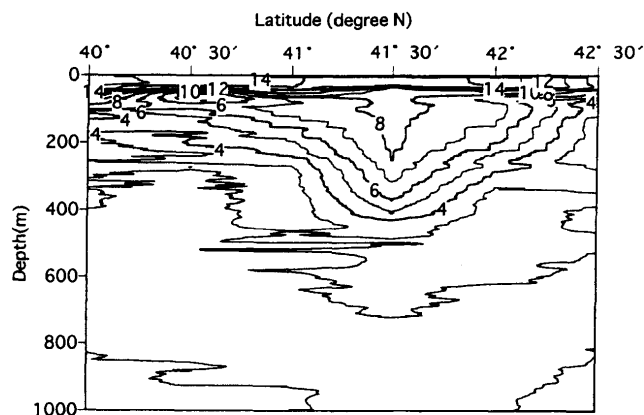


図 4 1000 m までのポテンシャル水温の分布. 145° E に沿って 40° N から 42° 30' N まで.

Fig. 4 A 0-1000 m potential temperature transect from 40° N to 42° 30' N along the 145° E.

た北緯40度から42度30分 (S-1~N-1) までの南北断面図を示す。各測点とも表層から1000mまで1mおきに得られたデータを用いている。なお水温、密度についてはポテンシャル水温およびポテンシャル密度を用いている。以降水温、密度と言った場合それぞれポテンシャル水温、ポテンシャル密度をさす。

北緯41度30分 (測点C) 付近を中心にして南北80~100km、深度400m程度の範囲に、水温6~10°Cのすり鉢状の等温の水塊が存在している。密度についても同様の分布を示し、等温の水塊の密度は26.4~26.6であっ

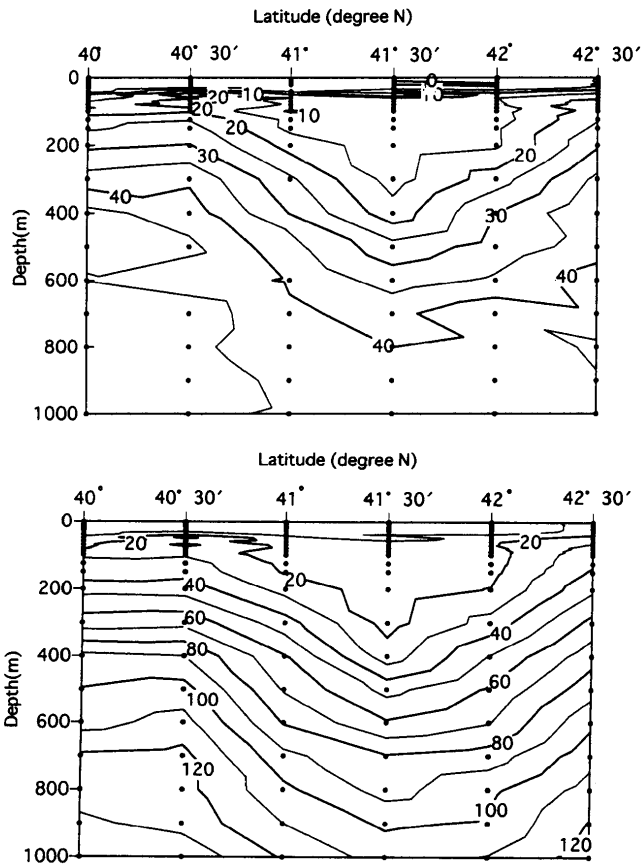


図 5 1000 m までの栄養塩の分布. 上 NO_3^- 下 SiO_2 145°E に沿って 40°N から $42^\circ30'\text{N}$ まで.

Fig. 5 A 0-1000 m nutrients transect from 40°N to $42^\circ30'\text{N}$ along the 145°E . Upper is NO_3^- , lower is SiO_2 .

表 1 暖水塊内部の栄養塩平均濃度.

Table 1. An average concentration of nutrients in Warm-Core Ring.

	NO_3	PO_4	SiO_2
暖水塊	14.76	0.72	18.75
暖水塊表層	0.67	0.02	4.17
N-1 表層	5.12	0.47	13.06

た. また, S-1 から N-3 にかけて深度 50 m 付近に躍層が存在しているが, N-1 ではみられない. このような分布はこれまでの三陸沖や Gulf Stream の暖水塊の研究でも報告されている (李・杉本, 1989; SCHUMITT & OLSON, 1985).

図 5 に硝酸, けい酸の S-1 から N-1 の南北断面図を示す. 図中の黒点は採水した点を示している. 硝酸, りん酸, けい酸の分布は水温, 密度とほぼ同じような分布をしている. 測点 C を中心に周りの同深度に比べ濃度の

低い等濃度の水塊が存在している. また, S-1 から N-3 にかけて深度 50 m 付近に躍層が存在しているが, N-1 ではみられない. この暖水塊, および表層 (躍層より上の部分) の平均濃度を表 1 に示す. なお, 暖水塊については, 水温が $5\sim 10^\circ\text{C}$ かつ密度が $26\sim 26.6$ の範囲に入る部分を暖水塊とし, 表層については, 密度が 25.3 以下の部分を表層としている. これらの栄養塩の分布は, これまでの報告例とも一致している (李・杉本, 1989). 但し, 栄養塩の濃度は暖水塊内部において若干高くなっている. つまり, この 93A 暖水塊は, 暖水塊としては一般的なものではあるが, 観測を行ったのが形成から約 4 年後であったため, 親潮との混合がより進んだ状態にあるものと考えられる.

暖水塊 93A の構造に関する検討

栄養塩と水温, 塩分等の関係

KH-97-3 で調査を行った暖水塊 93A について, クロフィル-a の測定結果などから, 中心部より縁辺部で生物生産が活発であるという結果が得られた. このような現象はこれまでに観測されたほかの暖水塊の調査結果においてもいわれている (李・杉本, 1989; SMITH & BAKER, 1985; YENTSCH & PHINNEY, 1985). しかし, 縁辺部での活発な生物生産を支える栄養塩の供給経路について, 明確な説明はされていなかった. そこで, 本研究において得られた水温や塩分と言った海洋の物理データと栄養塩の分布を用いて, 暖水塊の水塊構造について検討を行った. 但し, 亜硝酸は他の栄養塩に比べ濃度が小さく, 生物活動による濃度変化が大きいため水塊構造の検討には不向きと判断し用いていない.

まず, 栄養塩と密度の関係について, 密度を用いて水塊を混合層, 躍層, 暖水塊, 中深層水の 4 つに分けて検討を行った. 但し, 暖水塊については, 水温も条件に加えた. 図 6 に S-1 から N-3 における硝酸と密度の相関

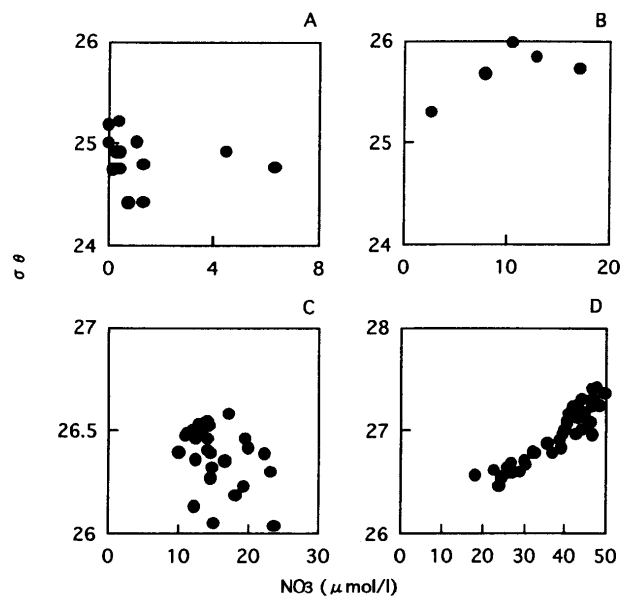


図 6 NO_3^- とポテンシャル密度の関係. A: 表層 B: 躍層 C: 暖水塊 D: 深層水.

Fig. 6 The relationship between NO_3^- and potential density (σ_θ). A: mixed layer B: thermocline C: Warm-Core Ring D: deep-sea water.

図を示す。

S-1 から N-3 では、混合層、躍層、暖水塊については栄養塩と密度の間に明確な相関は見られていないが、中深層では良い相関が得られている。しかし同じ暖水塊内部の定点 N 4-1 の結果では混合層、躍層で明確な相関が見られていないが、暖水塊、中深層では、良い相関が得られている。このことは次のようなことを示す。S-1 から N-3 のほうは、暖水塊の縁辺部、中心など暖水塊全域

について検討しているのに対し、N 4-1 のほうは暖水塊内の 1 点についてのみの検討である。つまり、暖水塊内部はこれまでほぼ均一であると考えられていたが、実際は、かなり複雑な構造をしていると考えられる。これは、暖水塊を構成している海水が黒潮起源の海水と親潮起源の海水の混合により形成されていること、そして暖水塊内部へ栄養塩を供給するストリーマーの流入量が一定でないことが原因であると考えられる。

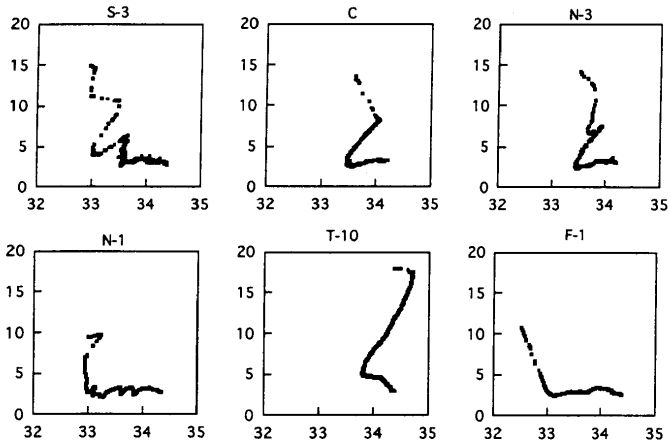


図 7 暖水塊内外の TS Diagrams.
Fig. 7 TS Diagrams of in and out of Warm-Core Ring.

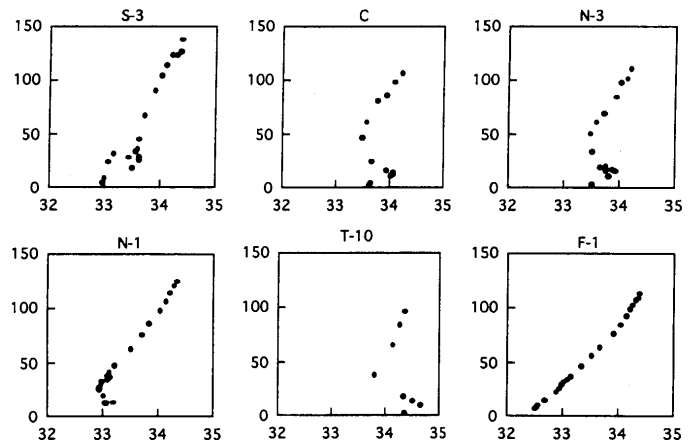


図 8 暖水塊内外の SiO₂-S Diagrams.
Fig. 8 SiO₂-S Diagrams of in and out of Warm-Core Ring.

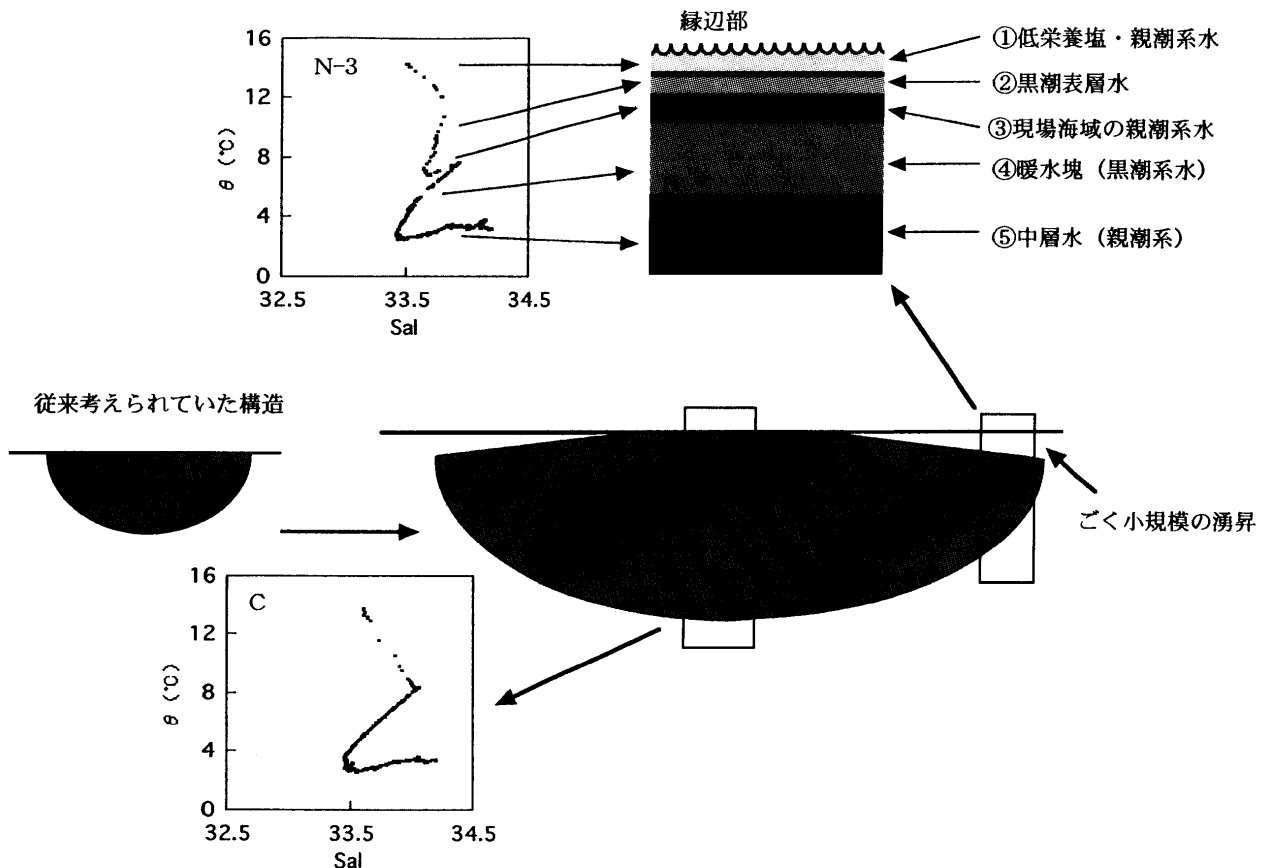


図 9 暖水塊の構造に関する仮説.
Fig. 9 The hypothesis of the form of Warm-Core Ring.

また、F-1においては躍層においても栄養塩と密度の間に良い相関が見られている。これは暖水塊表層に複雑な構造があることを示している。

次に TS Diagram について検討を行った。TS Diagram は海洋構造を解明するとき最も良く用いられる検討法である。特徴としては、海洋において水塊の起源が同じ海水、例えば、黒潮、親潮などは調査地点が異なっても同じ分布を示す。また、一つの水塊は TS Diagram 上で直線に並ぶ。

図7にこの海域の TS Diagram を示す。なお、水温、塩分は断面図等と同様に表層から 1000 m までの 1 m ごとのデータを用いている。T-10 は黒潮を、F-1 は親潮を代表する測点である。そしてこの二つの水塊の混合により形成されている暖水塊中心部の C では逆 S 字型の分布をする。そして縁辺部の測点 N-3 では暖水塊上部に親潮起源の海水の流入が認められる。従来いわれていたように暖水塊がレンズ型の構造を持つと考えた場合、このように、中心部と縁辺部において、TS Diagram に違いは現れない。つまり、縁辺部では暖水塊表層が、何層かの部分に分けられるものと考えられる。このような傾向は SAINO (1992) においても見られている。また S-3 では親潮起源水の流入が非常に大きくなっているが、これはこの部分にコールドストリーマーと呼ばれる親潮からの流入があったことによる。これは栄養塩の断面図において S-3 の 150-200 m 付近に存在する栄養塩の極大部分に相当する。また、N-1 では、基本的に親潮型の分布であるが、表層の下部(深度 30 m 程度)に黒潮起源水の流入が認められる。

また前述の TS Diagram と同様に、塩分とけい酸を用いて海洋構造の検討を行った。TS Diagram と同じく、黒潮、親潮では異なった分布を示す。けい酸を用いたのは、表層において枯渇していないこと、大気中からの供給がほとんどないと考えられるためである。

図8にこの海域の塩分とけい酸の相関 (SiO₂-S Diagram) を示す。親潮域の F-1 では直線上に並ぶが、黒潮起源の T-10 では、表層付近に高塩分方向の極大が見られる。そして、この二つの水塊により構成されている暖水塊では表層の極大が T-10 に比べ小さくなる。N-3 においては更に小さくなっている。また、極大付近で一部低塩分方向に戻る傾向も見られる。また、TS Diagram と同様に、中心から離れた点においては、極大部分が小さくなる傾向を示す。また、S-3 では直線上に並ぶ点が低栄養塩部分(表層付近)にも見られる。これは、TS Diagram でもみられたコールドストリーマーの影響である。そして N-1 はごく小さい極大が見られている。

暖水塊の構造に関する仮説

栄養塩と物理データとの検討を行った結果を簡単にまとめると次のようになる。まず、暖水塊の中心と縁辺部では、表層の構造が異なる。縁辺部には、親潮起源の海水の影響が強く出ている。また、暖水塊内部では、特に栄養塩の濃度から見た場合不均一である。

このような特徴を持つ暖水塊の構造として次のような仮説を立てた。この仮説の概要を図9に示す。従来レンズ型であると言われていた暖水塊は、縁辺部が海面より少し沈んだ構造を持つ。そして、その上部に複雑な構造の表層を持つ。最も表層には栄養塩の消費された親潮起源の海水、その下に黒潮起源の海水、その下に現場の海域にあったと思われる親潮起源の海水が存在している。その下に暖水塊がある。表層を形成する水塊のうち上の

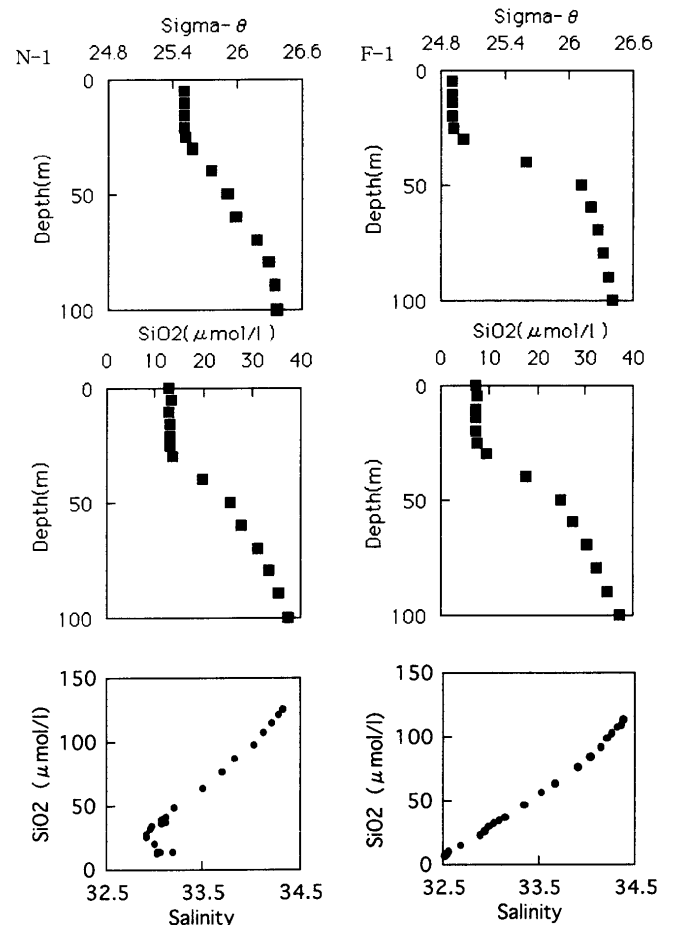


図10 N-1とF-1の比較。

Fig. 10 The comparison between N-1 and F-1.

2層は南方から流入してきたものと考えられる。そして、この3つの水塊は、暖水塊表層で循環していくうちに混合が進み、中心部の暖水塊表層を形成する。

また、縁辺部が表層より下に位置することにより、暖水塊が移動する際に暖水塊の先端は現場海域の垂表層付近に進入する。これにより、先端においてごく小規模な涌昇が起り、縁辺部に栄養塩を供給している。このことにより、暖水塊縁辺部での、中心部よりも活発な生物生産が支えられている。今回の調査において N-1 の地点が涌昇の起っている部分であると思われる。図10に N-1 と F-1 の密度、けい酸等の比較を示す。2地点とも水温、密度から判断した場合、暖水塊を構成する水塊が存在しない親潮域であるが、表層において密度、けい酸の濃度とも N-1 のほうが F-1 に比べ明らかに高くなっている。また、塩分とけい酸の関係も表層付近で違っている。

今後、暖水塊の縁辺部の活発な生物生産に関して、今回の仮説以外の意見、例えば、河宮・岸(1997)では、モデル計算により、暖水塊縁辺部のクロロフィル量の増大は廻りに海域から巻き込まれているものである。というような他の意見との比較検討が必要である。

まとめ

今回、三陸沖の暖水塊の調査により暖水塊の縁辺部に

おける、中心部より活発な生物生産を支える栄養塩供給経路について、暖水塊の構造を水温、塩分、密度および栄養塩を用いて解明し、構造について次のような仮説を立てた。

暖水塊の縁辺部は海面から少し潜った構造を持ち、暖水塊先端部は、親潮域の垂表層付近に流入する。この結果、暖水塊先端部において小規模な涌昇が起こり、これが縁辺部での活発な生物生産を支えている。

今後、この仮説が寿命の若い暖水塊や他の季節にも成り立つのか。また、ほかの仮説との比較検討も必要である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京大学海洋研究所杉本隆成博士をはじめとして、白鳳丸に乗船された研究員、並びに白鳳丸乗船員の皆様には、多くのご支援、ご協力をいただいた。また、静岡大学理学部皆川昌幸博士に多くの御助言をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

鈴木研究室の滝雅人さん、高山力也さん、篠村理子さん、東京大学工学部藤井実さんと共に 97 年度の航海において共に白鳳丸に乗船し船上で多くの御支援、ご協力をいただいた。また、研究室の皆様には様々な御協力を頂いた。重ねて深く感謝しお礼を申し上げ謝辞とさせていただきます。

引用文献

- BRZEZINSKI M. A. (1985), The Si: C: N ratio of marine diatoms: interspecific variability and the effect of some environment variables. *Journal of Phycology*, **21**, 347-357.
- GALSID E. C. (1982), A chemiluminescent technique for the determination of nanomolar of nitrate, nitrate and nitrite, or nitrite alone in sea water. *Marine Chemistry*, **11**, 159-167.
- GISMERVIK I. (1997), Stoichiometry of some marine planktonic crustaceans. *Journal of Plankton Research*, **19**, 279-285.
- GLIBERT P. M., LIPSCHULTZ F., MACAETHY J. J. & ALTERBET M. A. (1982), Isotope dilution models of uptake and remineralization of ammonium by marine plankton. *Limnology and Oceanography*, **27**, 639-650.
- GOLDMAN J. C. & MACAETHY J. J. (1978), Steady state growth and ammonium uptake of a fast-growing marine diatoms. *Limnology and Oceanography*, **23**, 695-703.
- 岩田樹哉 (1996), サンゴ礁海水中の栄養塩の動態. 静岡大学理学部卒業研究 河宮未知生・岸 道郎 (1998), 三陸沖暖水塊 93 A の物理-生態系モデリング. 月刊海洋, **13**, 96-102.
- 李 健・杉本隆成 (1989), 暖水塊中の栄養塩, クロロフィルの分布と挙動. 月刊海洋, **21**, 729-737.
- MACAETHY J. J., GALSID E. C. & NEVINS J. L. (1992), Nitrate supply and phytoplankton uptake kinetics in the euphotic layer of a Gulf Stream warm-core ring. *Deep-Sea Research*, **39**, S393-S404.
- NELSON D. M. & SMITH W. O. (1986), Phytoplankton bloom dynamics of the western Ross Sea ice edge-II. Mesoscale cycling of nitrogen and silicon. *Deep-Sea Research*, **33**, 1389-1412.
- REDFIELD A. C. KETCHUM B. H. & RICHARDS F. A. (1963), The influence of organisms on the composition of sea water. M.N. HILL (ed.), *The Sea*, Vol.2, Interscience, New York, 26-77.
- SAINO T. (1992), ¹⁵N and ¹³C natural abundance in suspended particle organic matter from a Kuroshio warm-core ring. *Deep-Sea Research*, **39**, S547-S362.
- SCHUMITT R. W. & OLSON D. B. (1985), Wintertime convection in warm-core rings: Thermocline ventilation and the formation of mesoscale lenses. *Journal of Geophysical Research*, **90**, 8823-8837.
- 申 弘烈・永田 豊 (1989), 1987年9月における三陸沖暖水塊 (86 B), の微細構造と水型分布. 月刊海洋, **21**, 652-661.
- SMITH R. C. & BAKER K. S. (1985), Spatial and temporal patterns in pigment biomass in Gulf Stream warm core ring 82 B and its environs. *Journal of Geophysical Research*, **90**, 8859-8870.
- 安田一郎・奥田邦明 (1989), 黒潮系暖水塊 86 B の形成・移動・変質過程. 月刊海洋, **21**, 639-651.
- 為石日出生 (1998), 魚群の回遊と漁場形成に果たす暖水塊・暖水ストリーマの役割. 月刊海洋, **13**, 103-109.
- YENTSCH C. S. & PHINNEY D. A. (1985), Rotary motions and convection as a means of regulating primary production in warm core rings. *Journal of Geophysical Research*, **90**, 3237-3248.
- WILKERSON F. P. & DUGDALE R. C. (1996), Silicate versus nitrate limitation in the equatorial Pacific estimated from satellite-derived sea-surface temperature. *Advanced Space Research*, **18**, 81-89.