

1999年6月の相馬海域における異常漁獲現象に対する 黒潮移流の影響

INFLUENCE OF ADVECTION OF KUROSHIO WATER ON ABNORMAL CATCH OF FISH IN
JUNE 1999, AT THE COASTAL ZONE OF SOMA, NORTHEAST JAPAN

楊燦守¹・田中仁²・沢本正樹³・花輪公雄⁴

Chan-su YANG, Hitoshi TANAKA, Masaki SAWAMOTO, Kimio HANAWA

¹ 学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉 06)

² 正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉 06)

³ フェロー工博 東北大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区青葉 06)

⁴ 理博 東北大学大学院教授 理学研究科地球物理学専攻 (〒980-8578 仙台市青葉区青葉)

We analyze month-to-month variability of offshore condition using chlorophyll concentration based on *in situ* and satellite observations and to examine the abnormal catch event around sea area of Soma in June 1999. Time series of vertical distribution of DO and nutrient concentration (nitrogen, phosphorus), wind vector and AVHRR/SST are also used to understand the surrounding environments around Sendai Bay. SeaWiFS-derived concentration of chlorophyll a reveals that Sendai Bay represents small seasonal variation and the coastal region around the bay seems to be not affected directly by offshore condition. It is found that the abnormal catch phenomenon resulted from that the occurrence of advection and upwelling in this area does not appear to be due to the local wind but offshore current.

Key Words : sea temperature, upwelling, chlorophyll a, Kuroshio, Oyashio, NASA/SeaWiFS
Sendai Bay, abnormal catch of fish

1. はじめに

本州東北沖合は、西岸に沿って北上する黒潮本流が続流に移り、また親潮が南下し、さらにその間には暖水塊または混合水が存在している。浮魚類の魚場は、一般に暖流・寒流の前線境界域に形成されるので、東北海域は日本でも有数の前線魚場となっている¹⁾。

為石¹⁾は、福島沿岸域で沖合の暖水ストリーマが魚道となることを実証した。すなわち、沿岸海域は沖合の影響を受けやすく、生物学的な面からも異常現象が起こる可能性を持つ海域である。実際、1999年6月上旬頃から福島県相馬海域で、活力の弱い鮮魚が大量に水揚げされた。

図-1は相馬海域でさし網(gill net)によって水揚げされたイシガレイ(flatfish)の漁獲状況である。イシガレイはカレイ科イシガレイ属に分類され、水深100mぐらいまでの底質が粗い砂の海域に生息する。低酸素水の影響を受けやすい寒海性の底生性魚類であるため、低酸素水発生の指標としても利用されている²⁾。

一般に、水揚げされる量は活魚(live fish)が鮮魚(fresh fish)より多いが、特に29日には鮮魚が活

魚の約2倍になったことが分かる。1988年にも同じ事例があった。このような深海魚の大量水揚げは津波発生の前兆である可能性もあり、防災関係者を神経質にさせるものである。

一方、図-2は気象庁海洋月報の1999年6月の日本近海表層水温図(深さ100mと200m)から書き直したものである。1999年の春は東北沖合で暖水塊ではなく、黒潮本流が38°N近くまで到達した。すなわち、沖合海流が沿岸に影響を及ぼした可能性が大きいことが分かる。すなわち、上記の異常現象が風ではなくて海流による湧昇または移流による現象であると

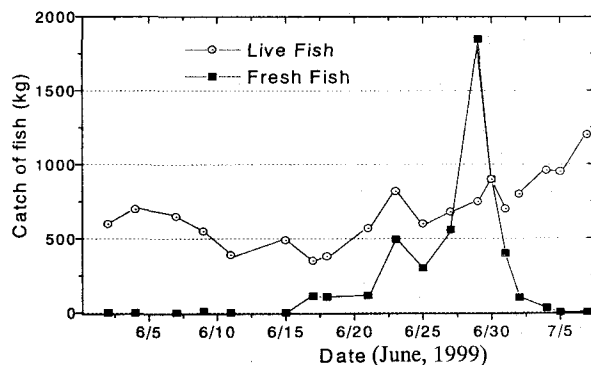


図-1 相馬でのイシガレイの水揚げ状況(さし網)

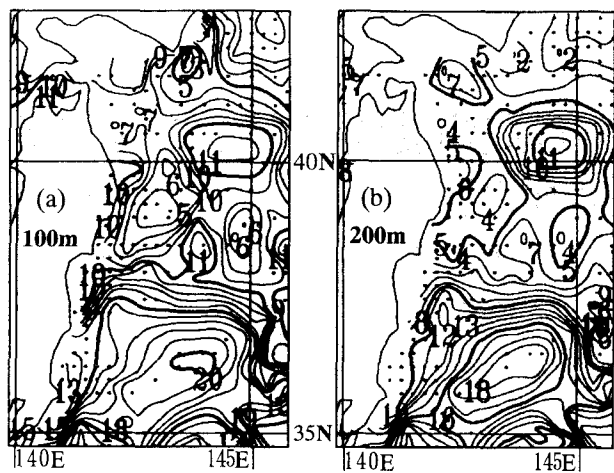


図-2 1999年6月の日本近海表層水温図(深さ100mと200m), 気象庁海洋月報による。

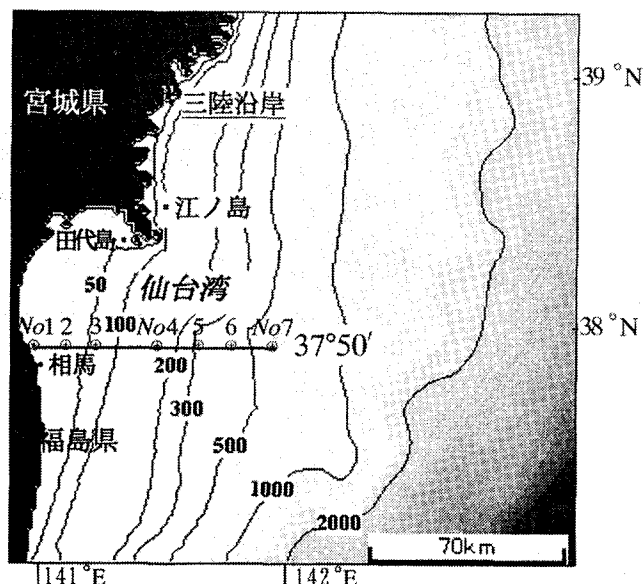


図-3 対象海域とその水深図(コンターはメートル)

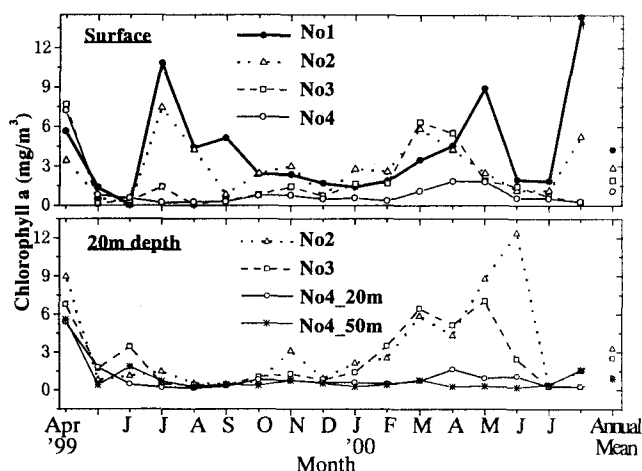


図-4 クロロフィル a 濃度の月変化。

は陸地による放射の影響が及んでいる沿岸域を対象とするため合成画像を作成した。また、1998年12月から2000年8月までの画像からクロロフィル a の月平均場を作り、海況の解析を行った。

3. 三陸沿岸の気象要素変動特性と沖合の海況解析による沿岸水塊の影響

(1) 沿岸と沖合でのクロロフィル a 濃度変化

海水中のクロロフィル a の濃度は主として植物プランクトンの存在量を表している。そしてクロロフィル a 濃度の変化は動物プランクトンの増減にも影響を及ぼす。親潮は一般に表層で栄養塩濃度が高く、生物生産が高いことが知られている。黒潮/親潮混合域のクロロフィル a の南北断面図によると、40°N より北側は緯度の増加に伴いクロロフィル a 濃度が高くなる^{5), 6)}。一方、およそ70mより深いところでは、ほとんど存在していない。

まず、クロロフィル a の一般的な特性を調べるために図-4に37°50'N線で実測クロロフィル a データ

推定できる。

衛星水温データによる沿岸の水塊の解析は困難であるが、NASA/SeaWiFSによる衛星クロロフィル a データは水深約30m程度の水塊変動を理解するために使用できる^{3), 4)}。

本研究では、外洋の流況に伴う海洋生物学的要素の変動特性に着目して、大気条件、鉛直水温・塩分・クロロフィル a (実測と衛星データ)・D0および栄養塩類データの解析を行う。そして、黒潮・親潮境界域の沿岸における底生性魚の異常漁獲現象の背景を調べ、そのメカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 使用データと解析方法

本研究では、図-3に示す仙台湾に面する相馬を中心に、宮城県と福島県の沿岸および沖合を対象として考察する。

使用データは、海洋観測資料・風速・衛星画像データの3種類である。海洋実測データは、福島県水産試験場による海洋沿岸定線観測データ(水温と塩分)、および漁場生産力モデル開発基礎調査データ(窒素、リンなどの栄養塩濃度、クロロフィル a とD0)である。また、風による沿岸湧昇を調べるために大気要素の中の風データ(AMeDAS)を用いた。実測場所は、図-3の37°50'N線であり、N01は141°02'E, N02(141°06'E), N03(141°12'E), N04(141°24'E), N05(141°36'E), N06(141°45'E), N07は142°Eである。

衛星データとして、東北大学大型計算機センターの日本画像データベース(JAIDAS)からNOAA/AVHRRのチャンネル4(遠赤外域)データとNASAのSeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor)を利用した。ここで、薄い雲の影響を取り去るため、取得時間差が短い画像を合成した。クロロフィル a のSeaWiFSはNASAが開発したSeaDAS(SeaWiFS Data Analysis System)プロセッシングシステムによって大気・地理補正がすでに行われているが、本研究で

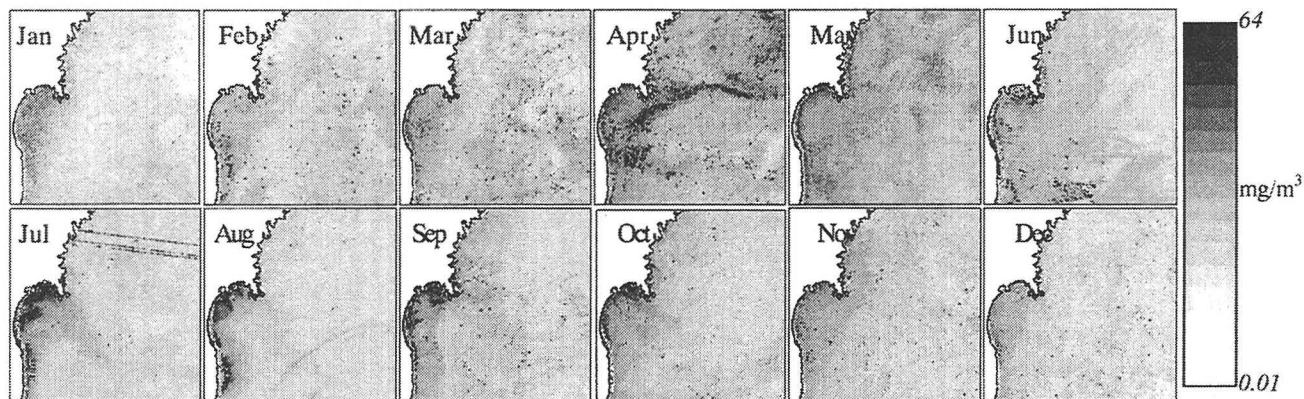


図-5 月平均のクロロフィル a 画像 (色は対数関数的なスケール)

の時系列を表面と低層に分けて示した。これらの時間変化には3つの大きな特徴が見られる。すなわち、沿岸から11kmぐらいの沿岸域(N01とNo2)と沖合域とは濃度差が大きく異なること、表面と20m水深とは時間による変動が似ているが表面の濃度がやや高い傾向があることである。もう1つは、全域と全層で毎年春に高いという季節変動(N03・4, 低層は小さい)が見られることである。

太平洋沿岸海域における基礎生産量の大部分は春季ブルーミング期に形成され、それに関与する黒潮や親潮などの移流の効果も重要である^{5), 6)}。春は黒潮と親潮ともに強くなる時期である^{7), 8), 9)}。

図-5は1998年12月から2000年8月までのSeaWiFS画像から作成した月平均クロロフィルa濃度の時系列である。まず、図-5に示したクロロフィルa画像によって仙台湾周辺に対する沖合の黒潮・親潮の影響の範囲を調べる。沖合(水深200m以上)は沿岸海域(水深200m以下)よりかなり低濃度であり、春以外はその変動が小さい。沖合では春(4-6月)に最大(平均2.64 mg/m³)、夏(7-9月)に最小(平均0.49 mg/m³)である。春の最大値はこの地域に形成される黒潮・親潮の海面水温(SST)フロントが原因であるため、図-5の4月画像のようにクロロフィルaの明瞭な前線が現れる。

沿岸地域でのクロロフィルaの季節変動は、その分布パターンを支配する沖合海流の状況と密接に関連している。すなわち、黒潮または津軽暖流の影響が大きくなる秋から冬にかけては三陸沿岸の濃度が低くなる。沿岸で高いクロロフィルa濃度は、牡鹿半島から福島県沿岸までに集中しており(平均4.6-8.3 mg/m³, 最大64mg/m³)、南に行くほどその東西幅が狭くなる。全海域の平均値は3.7mg/m³である。しかし、仙台湾(水深50mまで)は多少季節変動があるものの、一年を通して周辺よりかなり高い傾向がある。これらのことは、仙台湾がイカナゴなどの産卵場所として、また、この地域の沿岸が産卵の魚道¹⁾として知られている理由であると考えられる。

すなわち、仙台湾周辺は生物学的な面では一般に恵まれた場所であるが、開放性湾としては沖合の海流条件の影響を直接受けてはいることが分かる。

(2) 底生性魚の異常漁獲現象と生物学的要素

実測クロロフィルa濃度変化によると(図-4), 晩冬と春のピーク時には水深方向に一樣な分布となるが、夏の初めのピークは表層にだけ見られる。出現するプランクトンの優先種が変わった可能性も否定できないが、4-5月のピークは日射と沖合条件によって、7-8月のピークは日射のみによるものである可能性も考えられる。2000年と比べて春季ブルーミング期にも関わらず5月の表層は全地点でかなり低く、6月にはほとんど0に近い。また、5-6月に注目してみると、低層が上層より高く、6月にもっと高い(N04はあまり変わらない)。さらに、N04の20mでは5月より6月が低くなり、その状態が夏まで続いている。したがって、1999年5-6月には下層から黒潮系の水塊による

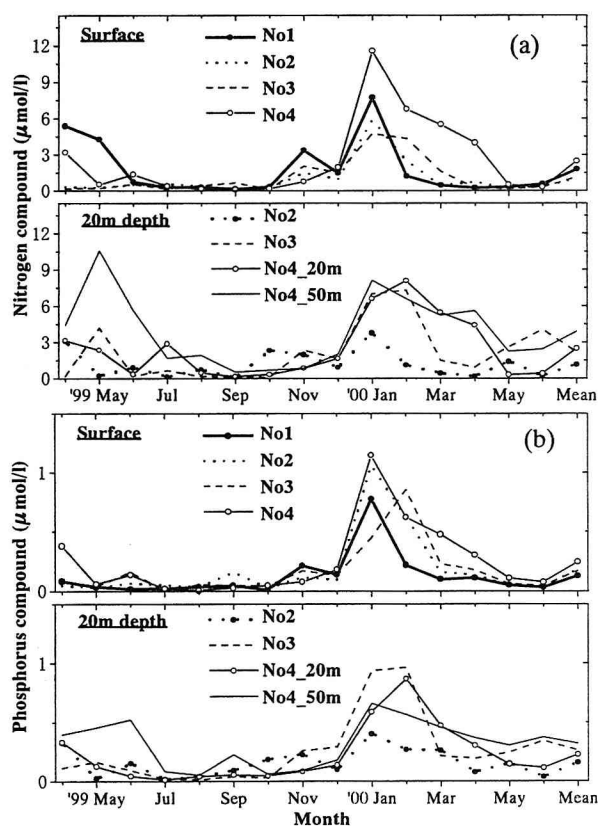


図-6 栄養塩の鉛直濃度(窒素(a), リン(b))の時系列 (縦軸のスケールが異なる)

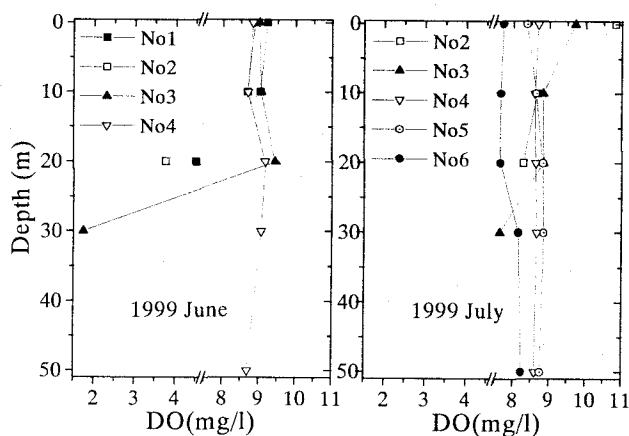


図-7 1999年6-7月のDO鉛直分布

移流または湧昇の可能性がある。

図-6は栄養塩濃度の中で窒素($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)とリン(phosphate, PO_4^-)を示す。栄養塩は陸地からまたは親潮から運ばれることが多い⁶⁾。栄養塩濃度で見られる大きな特徴は、1)低層が表層より高い、2)外海側が沿岸側より高い(11月と窒素の表層(4-5月))、3)ピークは11-4月であることである。すなわち、冬季の鉛直混合によって栄養塩に富んだ海水が表層に供給されていることを示すが1999年の5-6月には多少異なる傾向がある。

表層で、窒素とリンが5月から6月にかけて増加(N01例外)しているが(例えば、N04の窒素は0.5から1.4に)、逆に低層では減少(N02とN04_50m例外)している(例えば、N04の窒素は10.6から5.7に)。また、2000年6月と比べて表層は高く、低層は低い。したがって、N02の低層に侵入して来た水塊が湧昇したと判断される。

これらの推察は99年6-7月におけるDOの鉛直分布の変動(図-7)からも確認される。6月には各地点の低層でDO濃度がかなり低くなっているが7月にな

ると元に戻っている。すなわち、D0、栄養塩、クロロフィルが低い黒潮本流が沖合に存在し、重いその水塊が低層に沿って沿岸に移動することに伴い、低酸素に弱い魚が表面に上昇したといえる。

4. 実測データに基づいた沖合と風の変動性

図-8は1999年と2000年の5-7月における鉛直水温データの比較した図である。100m水深で10℃以上が黒潮系の水だとすると、1999年には7月まで黒潮本流が38°N付近に存在していることが分かる。黒潮本流の北上の程度は2000年春の時系列からも比較できる。NOAA/AVHRRによると、一般に春に黒潮と親潮の勢力は発達し、1999年には黒潮、2000は親潮の影響が強かった。

1999年の場合(図-8)、黒潮が月々に変動するので沖合(N04-6)ではV字型になり、2000年より高い。しかし、沿岸では時間のずれをもって応答し、6月には全層で2000年より水温が高く、表面では日射によってかなり高くなる。さらに、N01では6月にも関わらず0mと10m層の水温が同じなので、移流と湧昇の過程から混合されていると判断できる。

1999年の5-7月で表面水温の最大値が出現する測点は、5月にN01とN06、6月にN02とN03、7月にN01とN04であるので、移流による湧昇であることを意味する。風による湧昇の場合は、沿岸の表面水温が沖合より低くなる。そこで、湧昇を定量化するために SST_{index} がよく使われている^{8), 9)}。

$$SST_{index} = SST_{on} - SST_{off} \quad (1)$$

ここで、 SST_{index} は陸の方と沖合との表面温度差として現れ、その値が負であると湧昇を意味する。しかし、NOAA/AVHRR画像から得られた SST_{index} は、ゼロに近い値を示し、湧昇のような状況は見られなかった。

1999年の100m水深で水温がN05または6地点で

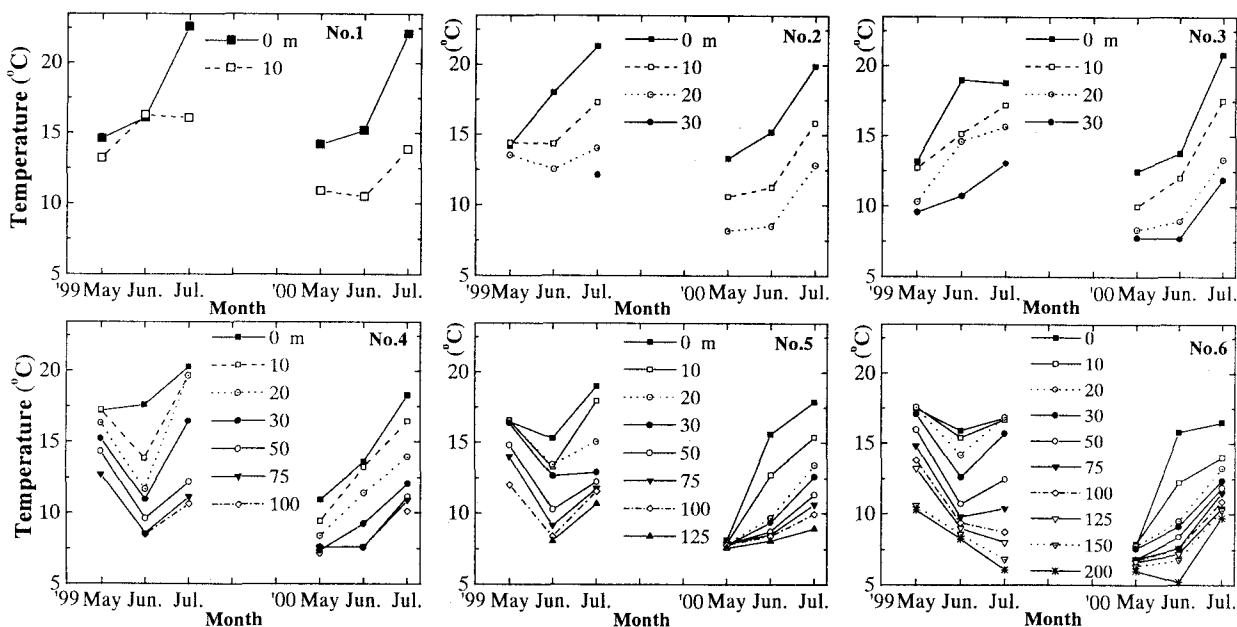


図-8 1999年と2000年の5-7月における鉛直水温データの比較

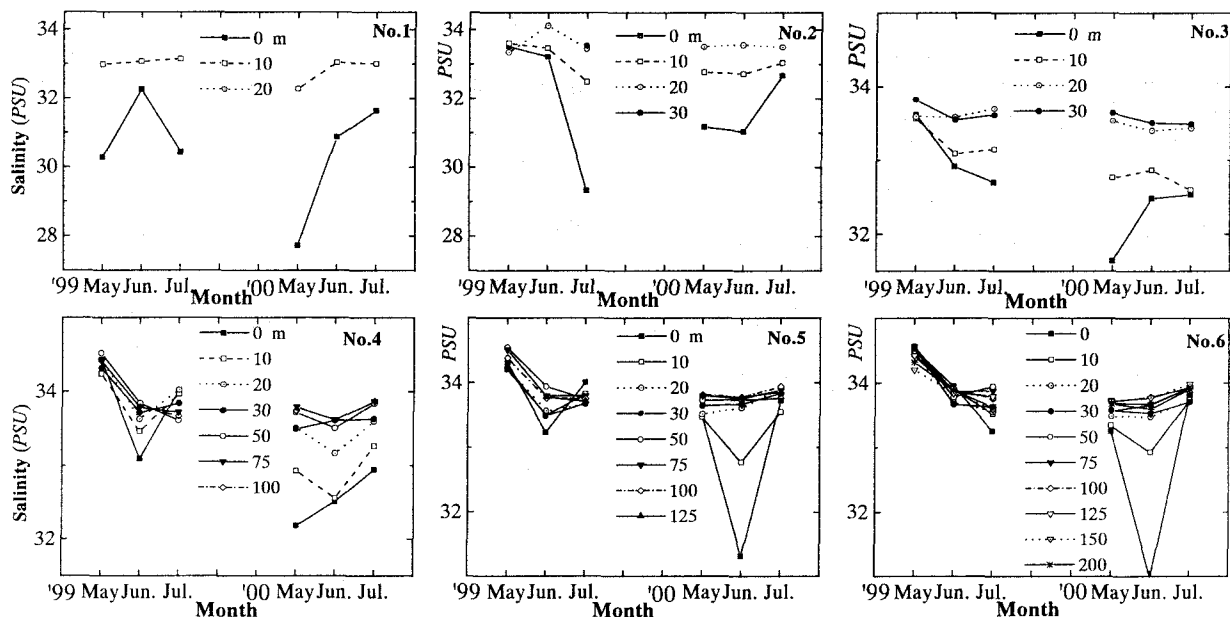


図-9 1999 年と 2000 年の 5-7 月における鉛直塩分データの比較 (N01・2 の縦軸スケールは他の図と異なる)

かなり高いので、黒潮本流の軸は沿岸から 100km 程度離れていたと考えられる。

図-9 には 1999 年と 2000 年の 5-7 月における鉛直塩分データを示した。1999 年の場合、N01 以外の全地点で 6 月までかなり混合されており、図-8 のように沖合の塩分データが「V」字型になっていることが分かる。特に、沖合では 7 月まで持続した。2000 年と比べて 5 月塩分が全層で高い。

N02 と 3 地点はかなり浅いところであるが、5 月には 0-20m は混合されており、塩分も高い。6 月になると N02 と 3 の 20m 水深では塩分が 5 月より増加し、また N02 の全層で塩分が 5 月と比べあまり低くならない。

塩分の鉛直データから、下層から沿岸に移動した水塊は N01 には余り影響を与えていないものの、N02 には強く影響を及ぼしていると考えられる。

一般に、相馬の周辺は風が弱く、6 月には一年の中で風速が最低になる (6 月気候平均 1.5m/s)^{10), 11)}。図-10 には松川浦 (1999 年 6 月) での AMeDAS による風ベクトルを示す。平均風速は 1.6m/s であり、また卓越する方向もなく、無風の頻度も 17.9% である。風の岸 (南北方向) に平行成分と直角成分の平均はそれぞれ 0.06m/s, -0.12m/s である。また、持続して吹いてないので、湧昇とは関係が低いといえる。

図-11 は図-2 の 37°50'N の線部分における水温、塩分の鉛直分布 (1999 年 5 月) をそれぞれ 1℃ と 0.2psu 間隔で示した。水温 13℃ の等温線でみると、沿岸から 30-40km 海域表面近くでピークがあり、他の等温線もそこで鉛直方向になっていることが分かる。そのピーク地点を中心に水塊が両側に分けられるように見える。60km 以上の沖合では黒潮が存在している。ピーク地点の左側は沖合の影響が大きいと推測される。塩分の鉛直断面分布から、水温の等値線のように、沿岸から 30-40km で鉛直になった等値線が

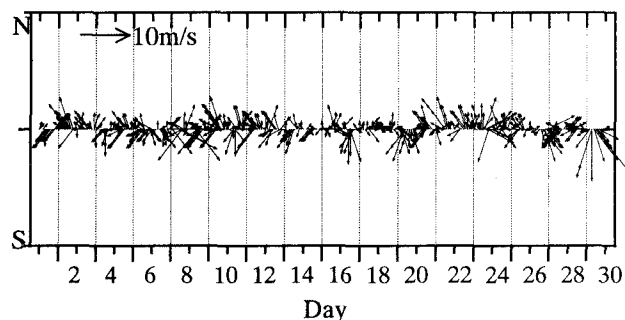


図-10 松川浦で風ベクトル (99 年 6 月)

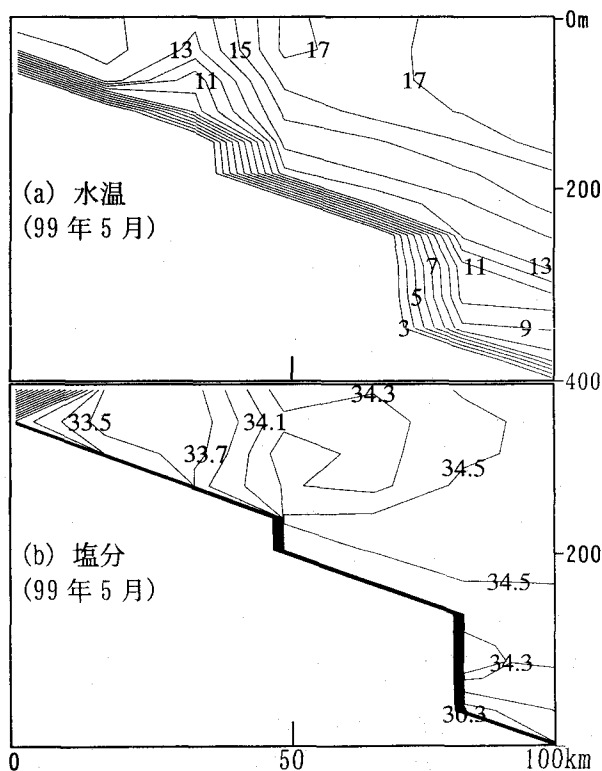


図-11 37°50'N での水温と塩分の鉛直断面分布

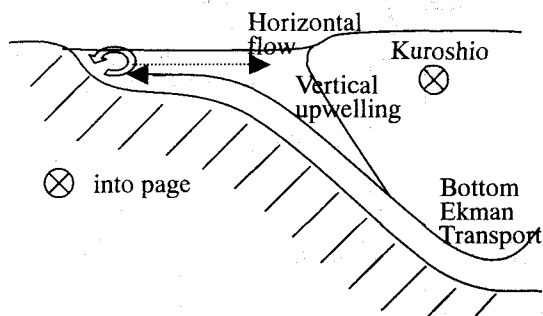


図-12 相馬海域で黒潮による沿岸湧昇の模式図

ある。また、そこを中心に両側の塩分が大きく変わる。

Bowden¹²⁾, Alae et al.¹³⁾, Herzfeld¹⁴⁾によると沿岸湧昇は風だけによって発生する現象ではなく、強い海流が大陸棚に沿って流れているとき、すなわち沿岸での地形要因によっても発生する現象であることを指摘している。ここで見出された現象も強い海流と地形要因によって生じた湧昇であると考えることができる。

上記の結果をまとめて示したものが図-12の模式図である。1999年6月に相馬海域における異常漁獲現象は黒潮移流によって発生したと結論できる。すなわち、5月から水深200m程度の沖合に存在していた黒潮本流からの水塊が海底に沿って沿岸に移動したのである。そして、この水塊は水深40m程度(図-2のNO2)で表面に湧昇することによって、その沿岸側と沖合の海域はそれぞれ異なる水温・塩分をとる。すなわち、海底エクマン層による沿岸湧昇である。また、表面には西岸境界流フロントと湧昇による沿岸フロントが発生すると考えられる¹⁴⁾。

5. 結論

クロロフィルa衛星データによる水深約30m程度までの水塊変動の解析結果、仙台湾は季節変動が小さく、沖合の条件の影響を直接には受けにくい場所であることが分かった。また、実測データとの比較を行い、1999年6月に相馬海域における異常漁獲現象との沖合条件との関連性を調べた。また、大気条件(風)、鉛直水温・塩分・DOおよび栄養塩類(窒素とリン)データも用いて解析を行った。

DOと栄養塩類は、クロロフィルaで見られる下層と表層の特徴とよく一致した。また、相馬での風は卓越方向が無く風速も低かったので風による湧昇ではないことが分かった。

鉛直水温・塩分の時系列データは、黒潮による移流および湧昇のパターンを示した。すなわち、1999年6月に相馬海域における異常漁獲現象は、海底エクマン層による沿岸湧昇であった。

湧昇した水塊のその後のふるまいに関する詳細な

調査が今後必要である。

謝辞：本研究の調査を行うに当たり、福島県水産試験場から貴重な資料を御提供頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 為石日出生：魚道は餌が豊富(研究船による検証)、写真測量とリモートセンシング、pp. 17-21, 1999.
- 2) 東京都内湾生息環境調査報告書：都内湾における底生性稚魚の出現と生息環境、No. 201, 1990.
- 3) Yang, C. S., Tanaka, H. and Sawamoto, M.: Analysis of coastal thermal environment and variability of SeaWiFS and AVHRR Imagery at the Kuroshio-Oyashio Frontal Region, *Proc. '99 Int'l Conf. on Korean Scientists and Engineers*, 1999.
- 4) Toba, Y. and H. Murakami: Unusual behavior of the Kuroshio Current System from winter 1996 to summer 1997, *J. Oceanogr.*, Vol. 54, pp.465-478, 1998.
- 5) 鈴木款・Casareto B. E.: 黒潮親潮混合域における粒子熊有機物の動態、月刊海洋、号外12号、pp. 122-130, 1998.
- 6) 日下彰・木村伸吾・杉本隆成：本州太平洋沿岸海域における春季ブルーミングと環境要因との関係、月刊海洋、号外12号、pp. 135-140, 1998.
- 7) 楊燦守・田中仁・沢本正樹・花輪公雄：仙台湾周辺海域水温環境に対する外洋・気象変動の影響に関する研究、海岸工学論文集、第46巻、pp.1326-1330, 1999.
- 8) Kriebel, S.K.T., Brauer, W. and Eifler, W.: Coastal upwelling prediction with a mixture of neural networks, *IEEE Trans. Geosci. Remot. Sensing*, Vol.36, NO.5, pp.1508-1518, 1998.
- 9) Nykjaer, N. and Camp, L.V.: Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, NO.C7, pp.14197-14207, 1994.
- 10) 楊燦守・田中仁・沢本正樹・花輪公雄：仙台湾周辺の熱環境評価、海洋開発論文集、第15巻、pp.135-140, 2000.
- 11) Yang, C. S., Tanaka, H., Sawamoto, M. and Hanawa, K.: Empirical orthogonal function analysis of Advanced Very High Resolution Radiometer sea surface temperature variability over the Northwest Pacific, *Progress in Coastal Engineering and Oceanography*, Vol. 2, ed. B. H. Choi, Hanrimwon Publishing Co., pp.131-142, 1999.
- 12) Bowden, K. F.: *Physical Oceanography of coastal waters*. Ellis Horwood Ltd., pp.162-184, 1983.
- 13) Alae, M.J., Pattiaratchi, C. and Ivey G.: A field study of the three-dimensional structure of the Rottneest Island wake, *Physics of Estuaries and Coastal Seas*, eds. Dronkers & Scheffers, Balkema, Rotterdam, pp. 239-245, 1998.
- 14) Herzfeld, M., Schldlok, M., and Tomczak, M.: Water mass formation, upwelling and fronts in the Great Australian Bight, *TOC and IOC Meeting on Coastal and Marginal Seas*, Paris, 1998.
- 15) 宇野木早苗・久保田雅久：海洋の波と流れの科学、pp.123-162, 1998.

(2000. 10. 2 受付)