

大船渡湾における海水密度変動による 海水交換と流況変動に関する検討

INVESTIGATION OF THE RELATIVITY BETWEEN SEAWATER EXCHANGE
AND SEA CURRENT PATTERN IN OHFUNATO BAY

佐藤博信¹・高橋研也²・野村宗弘³・沢本正樹⁴

Hironobu SATO, Kenya TAKAHASHI, Munehiro NOMURA and Masaki SAWAMOTO

¹学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²学生会員 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

³正会員 博(工) 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

⁴フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

The relation between seawater exchange and sea current pattern was investigated. For this purpose, ocean currents conditions were observed in Sanriku Sea off using NOAA/AVHRR data. It was confirmed that density variation is not so much affected by salinity. Therefore, the regression function is derived from observed density and the density which was calculated using constant value of salinity and observed temperature. Using the regression function, σ_t distribution in Sanriku sea off is evaluated from sea surface temperature data. As the result, the behavior of Oyashio water mass was observed from the σ_t distribution. Analyzing time series temperature and salinity data in Ohfunato bay, it was confirmed seawater exchange occurred under the influence of Oyashio water mass. It was also observed distributions of chlorophyll-*a* and nutrient change at this seawater exchange and small density variation affects chlorophyll-*a* distribution at the depth of middle layer.

Key Words : Oyashio, Tsugaru warm current, Sanriku sea off, stratification, density variation, sea surface temperature

1. はじめに

宿毛湾, 相模湾, 宇和島湾などで観測されている急潮に代表されるように, 全国各地において, 高密度湾外水の湾内への進入が, 湾内の水質構造を急変させることが知られている^{1)~3)}.

長尾らは, 三陸沿岸に位置する志津川湾の急激な海水交換発生が, 海流の影響によるものが大きいことを, 衛星データから取得された流況パターン分布と現地データを併用して示した⁴⁾. また, 低気圧による風送流が親潮を南下させ, 水温分布に影響を与えることにより, 海水交換が発生することを指摘した⁵⁾.

同じく, 三陸沿岸に位置する大船渡湾においては, 湾外高密度水塊の湾内底層部流入による, 湾内底層部の貧酸素水塊消滅現象のメカニズムが明らかにされている⁶⁾.

また, 岡田ら⁷⁾は, 湾外高密度水塊が湾内の同一密度層を選択して進入する密度貫入によって発生する海水交換が, 湾内底層部DO濃度へ与える影響を定量的に明らかにした.

一方で, 三陸沿岸の塩分, 密度変化と水位振動・海流挙動に関する研究も行われている.

日比野らは, 気圧水位変化と海面水位変化の関連性, 海面水位差と親潮南下の関連性を明らかにし⁸⁾, 海面水位差と大船渡湾内の塩分濃度との関連性に関して言及している^{9), 10)}.

また, 三陸沿岸に関しては, 沿岸境界流としての津軽暖流が影響を与えていることが知られている. 花輪らは, 津軽暖流が強いときは, 親潮南下が著しくても親潮系水塊が接岸できないことも示している¹¹⁾.

ここで, 親潮は低温低塩分, 津軽暖流は親潮と比較して高温高塩分であるため, これら二種類の海流の勢力の

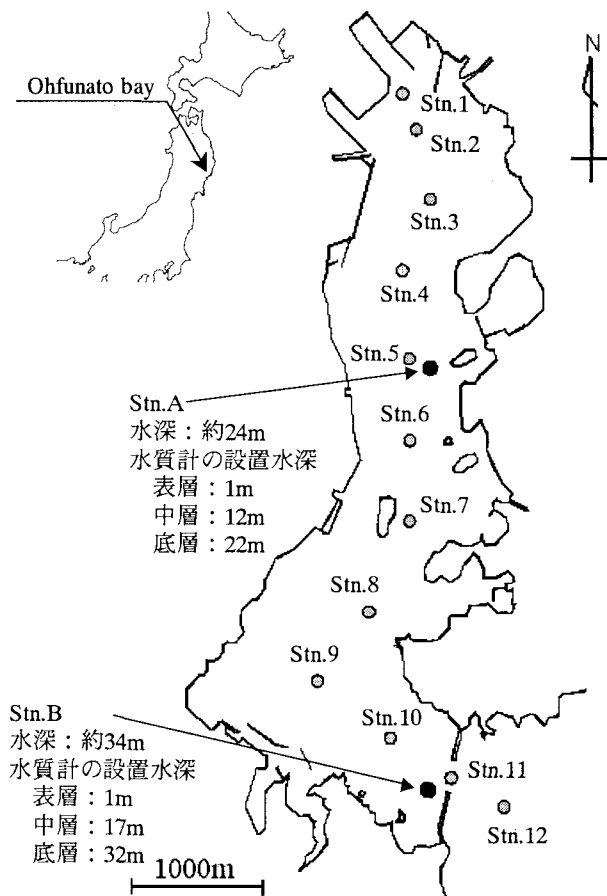


図-1 研究対象水域および観測地点。Stn. 1～Stn. 12は定点観測地点、Stn. A、Stn. Bは係留観測地点を示す。

変化は、密度の変化につながる。したがって、密度貫入の深さも変化する。密度貫入の深さが変わると、湾内の水質構造も当然変化してくるため、湾外の密度の把握をしないと海水交換による水質改善の影響が予測できない。

ここでは、これらの点を踏まえ、成層期の流況変化と密度変化および海水交換による湾内の水質分布に与える影響について、流況の観測に適したNOAA/AVHRRの熱赤外面像と、宮城県水産研究開発センターによる沿岸モニタリングデータおよび筆者らが2003年に行った現地観測より検討した。

2. 研究対象水域の概要および観測方法

(1) 大船渡湾の概要

研究対象の大船渡湾は三陸沿岸の岩手県大船渡市に位置し(39° 02′ N, 141° 44′ E), 全長6km, 水域面積7.89km²であり, 湾奥部に二級河川の盛川が流入するというきわめて単純な構造であり, 海水交換の影響を比較的とらえやすい水域である(図-1)。湾口部には津波防波堤および捨石マウンドが存在するため, 閉鎖度指標

(E. I.)は14.04と比較的高くなっている。なお, 湾口部捨石マウンド部の水深は約20mである。

湾内奥部には重要港湾大船渡港が整備されており, また, 平穏さを利用し, カキ, ホタテ, ワカメなどの養殖が行われている。このように人間活動の影響を受けやすいため水質が悪化しやすく, 水質保全策が求められている。このため, 海水交換による水質改善を促進する負圧利用型海水交換装置の設置が現在進められている。

(2) 現地観測の概要

実測は, 図-1中に示す, Stn. 1～Stn. 12の12地点において, クロロテック(アレック電子製ACL2180-TPM)により, 水面から鉛直方向に海底まで下降させ, 0.5秒間隔で水温, 塩分, Chlorophyll-*a*濃度を測定した。

一方で各地点において, バンドーン型採水器にて水深下1m(表層), 水深/2(中層), 海底上1m(底層)の位置で採水した。サンプル水は船上で0.45μmメンブランフィルターでろ過, 冷蔵保存後, NH₄-N, NO₂₊₃-N, PO₄-PについてTRAACS800(ブランルーベ製)で分析を行った。また, Stn. A, Stn. Bにおいて, 表層, 中層, 底層に水質計(アレック電子製COMPACT-CTおよび離合社製RMD0)を係留し, 水温, 塩分, DOの連続観測(測定間隔: 10分)を行った。

(3) 衛星デジタルデータの概要

親潮は寒流, 黒潮および津軽暖流は暖流のため, 海面温度(SST)分布図により判別することが可能であるので, 湾外の流況把握には, 日本画像データベース(JAIDAS) <<http://asiadb.cneas.tohoku.ac.jp/jaidas/>>で公開されている2003年の東日本のNOAA/AVHRRデジタルデータの熱赤外面像(Channel 4)を用いた。空間分解能は1.1km, 温度に関しては0.2℃の分解能がある。

3. 大船渡沖の水温, 塩分変化と流況の関係

(1) 大船渡湾外の水温, 塩分, σ_t の年変動

図-2に, 2003年に宮城県水産研究開発センターが約月一度行った大船渡沖(大船渡湾口部より10km東方, 39° 00′ N, 141° 50′ E)におけるCTD定点観測により観測された水温, 塩分, σ_t の値をT-Sダイアグラムにプロットしたものを示す。なお, 定点観測では1mおきに鉛直方向で計測しているが, 大船渡湾口部の水深が捨石マウンドの存在により20m程度しかないので, 水深15～20m程度の湾外水の密度変化が海水交換に直接影響を与えていると考えられる。したがって, 水深15～20mで計測された値の相加平均値を用いてプロットした。

図-2より, 塩分は, 年間を通してほぼ一定であるが, 4月および7月は低いことがわかり, 三陸沿岸への親潮

勢力の影響が示唆される。しかし、年間を通して密度変動に大きな影響を与えているのは水温であるので、水温だけで密度変動の見当をつけることは可能と考えられる。

ここで、年間の塩分濃度は33.62PSUと一定であると仮定して新たに σ_t を計算しなおしたものを $\sigma_{t,33.62}$ として、実測により算出された σ_t との相関図を図-3に示す。

このとき、回帰式は(1)式となる。

$$\sigma_t = 0.98\sigma_{t,33.62} + 0.40 \text{ (相関係数 } r = 0.99) \quad (1)$$

非常に相関はよく、少なくとも2003年に関しては、塩

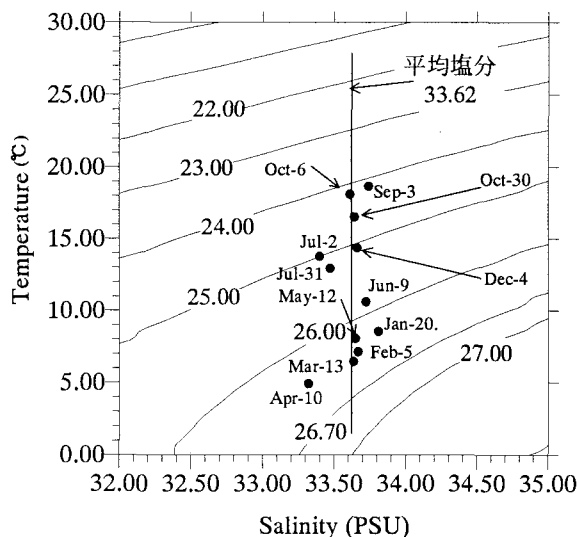


図-2 大船渡沖の塩分、水温、 σ_t の関係(水深15~20mの平均値)。等高線は σ_t を示し、単位は $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

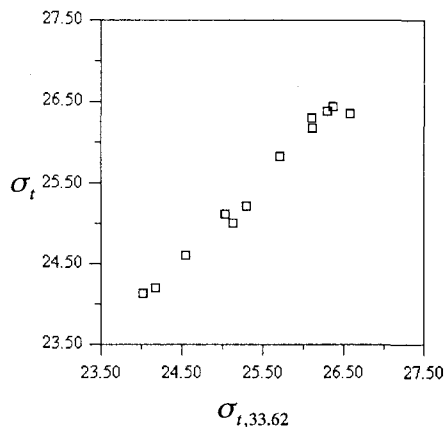


図-3 塩分を固定して算出した $\sigma_{t,33.62}$ と実測値の σ_t との比較(単位はいずれも $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

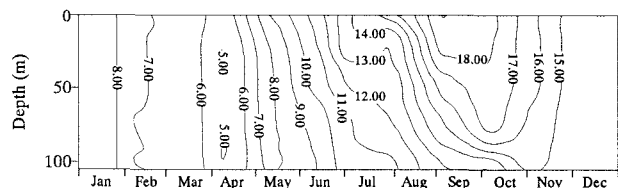


図-4 大船渡沖の鉛直水温分布図。(単位: °C)

分を考慮しなくとも、水温分布さえ考慮されていれば、海流勢力の変化による密度変動が湾内に及ぼす影響を明らかに出来ると考えられる。

(2) 海流の勢力変化と密度変動

日本海側を通る対馬暖流は、津軽海峡を通り津軽暖流となり、三陸沖を南下する。津軽暖流の流出形態には、津軽海峡を抜けたあとに、そのまま三陸沿岸を沿うように流れる沿岸モードと、襟裳岬付近まで張り出し、時計回りの暖水渦を形成した後に南下する渦モードの二種類のモードが存在し、通常は、冬~春は沿岸モードを形成し、夏~秋にかけて渦モードに変化することが知られている¹²⁾。

2003年のNOAA/AVHRRによるSST分布図によれば、9月中旬には親潮第一分枝の一部が三陸沿岸へ接岸している様子が確認されているので湾外密度の変化が予想される。図-4に、大船渡沖の定点観測により得られた水温の鉛直分布図を示す。9月に関しては、表層~水深30m程度の範囲は水温の差はほとんど見られない。また、NOAA/AVHRRは表皮層の水温を測定しているために、表層以深の層との水温勾配を考慮する必要も出てくるが、実際は、夏季に無風状態が続くといった特殊な条件下でない限り、考

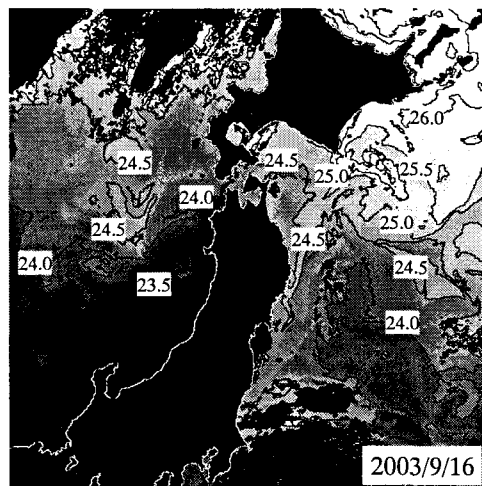
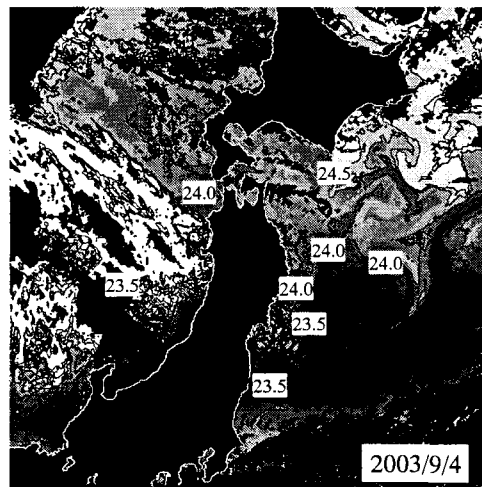


図-5 水深15-20mにおける σ_t 分布図(単位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

える必要がない。実際、沿岸より10kmも沖合において、無風状態というのはありえないので、この点については考慮する必要はない。よって、表皮層～水深30mまで水温は一律であると考えて差し支えないと考えられるので、SST分布図より $\sigma_{t, 33.62}$ を算出し、(1)式を用いて、親潮第一分枝が確認される前の9月4日と確認された16日の σ_t 分布図を作成した(図-5)。ここで、(1)式は水深15-20mの σ_t の平均値を用いて係数を決めているために、図-5で示す σ_t 値も水深15-20mの平均値である。

なお、塩分が33.6PSUで水温が20.0℃の場合と、同じ塩分濃度で20.2℃の場合とでは、密度差は $0.1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ である。ゆえに、温度の分解能が0.2℃のNOAA/AVHRRより求めた σ_t 分布図でも、小数点第一位程度の精度は期待できると考えられる。

図-5より、9月4日は、津軽海峡から襟裳岬までの幅広い範囲で、同一密度の水塊で覆われている。この日のSST分布図より、津軽暖流が渦モードの状態で三陸一帯を覆っており、親潮の影響はあまり受けていないことが確認されている。また、岩手県の三陸沿岸は $24.0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度であることがわかる。一方、9月16日は、襟裳岬付近まで親潮由来と思われる $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上の高密度水塊があり、親潮勢力が強いのがわかる。また、 $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上の親潮第一分枝が三陸沿岸まで延びている。このため、湾内においては $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 付近の層が密度貫入による海水交換の影響を受けることが推測できる。

4. 大船渡湾内の海水交換現象

(1) 親潮第一分枝による海水交換現象

図-6に、8月29日の大船渡湾内の鉛直 σ_t 分布および鉛直Chlorophyll-*a*分布を示す。 σ_t は水深25m以下では $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上であるため、この先、水深25m以下の突発的な σ_t 変動が無い限り、親潮第一分枝程度の水塊では、底層の水質まで大規模に変化する海水交換は発生しにくいことが予測される。しかし、Chlorophyll-*a*に関しては、水深5m以浅と10~25m付近の二極構造をとっている状態が確認できるため、何らかの変化が生じるものと予測される。

図-7、図-8に、Stn.A(中層:12m, 底層:22m)およびStn.B(中層:17m, 底層:32m)における、塩分、水温、 σ_t 、DOの時系列データを示す。

Stn.B中層において、塩分濃度は8月30日から9月4日ごろにかけて一旦上昇した後、9月8日にかけて低下している。今回の実測では残念ながら、この現象を説明できるデータは得られていない。

注目すべき点は、9月9~13日にかけて発生した温度、 σ_t の急変現象である。Stn.A、Stn.B共に、中層では水温は1~2℃程度低下し、あわせて σ_t は $0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度増

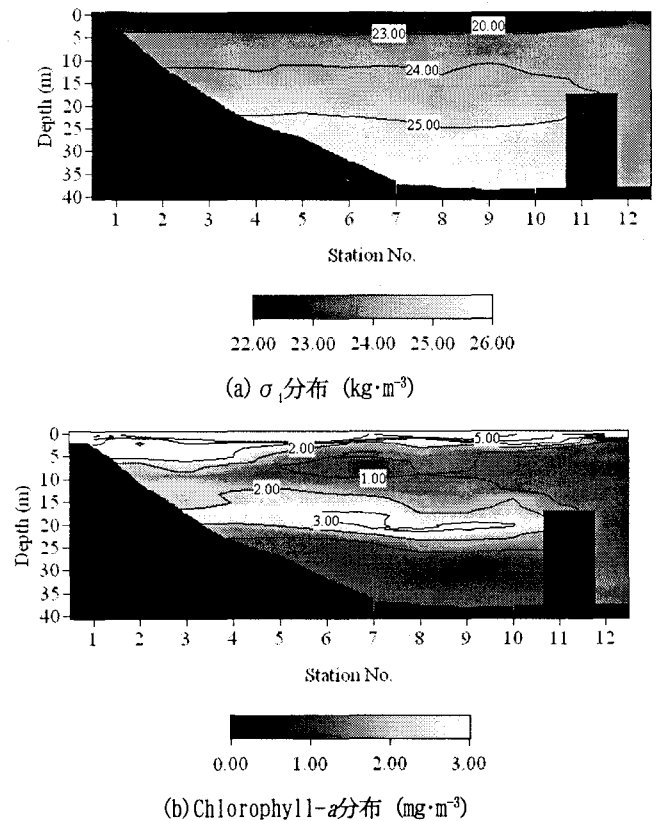


図-6 大船渡湾内の σ_t およびChlorophyll-*a*分布(2003/8/29, 上げ潮時)。図化する際、各測点番号は等間隔にしている。

加しており、特にStn.BにおいてはStn.Aよりも高く、 $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ にまで上昇していることがわかる。図-5に示す、9月16日の σ_t 分布図で確認できる親潮第一分枝の部分の密度が $24.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度であることを考慮すると、この時期に発生した海水交換においては、水深17m程度の深さを中心に親潮系水が流入したものと考えられる。また、Stn.B底層においては、10日から海水交換の影響によるものと見られる水温とDO濃度の振幅の増幅が見られるが、一時的なもので、DO濃度を見ても貧酸素水塊が消滅には関与しているとは言えないことから、大規模な水質変動は見られないと言ってよいものと考えられる。

また、水温等に関して、Stn.A、Stn.B両地点ともに同じ挙動を示しているものの値が異なっている。これは、Stn.B付近は湾外水の影響をダイレクトに受けるのに対し、Stn.Aに関しては、比較的奥まった場所にあるためであると考えられる。また、Stn.Aの中層と底層のDO濃度が13日に等しくなっており、海水交換によるStn.A底層へのDO供給が行われたと考えられる。いずれにせよ、10~13日の海水交換においては、Stn.B底層に一時的な水温およびDO濃度の大きな変動が見られたものの、大規模な水質変動が見られなかったことから、今回観測された海水交換は水深25mよりも浅い部分で発生していると考えられる。

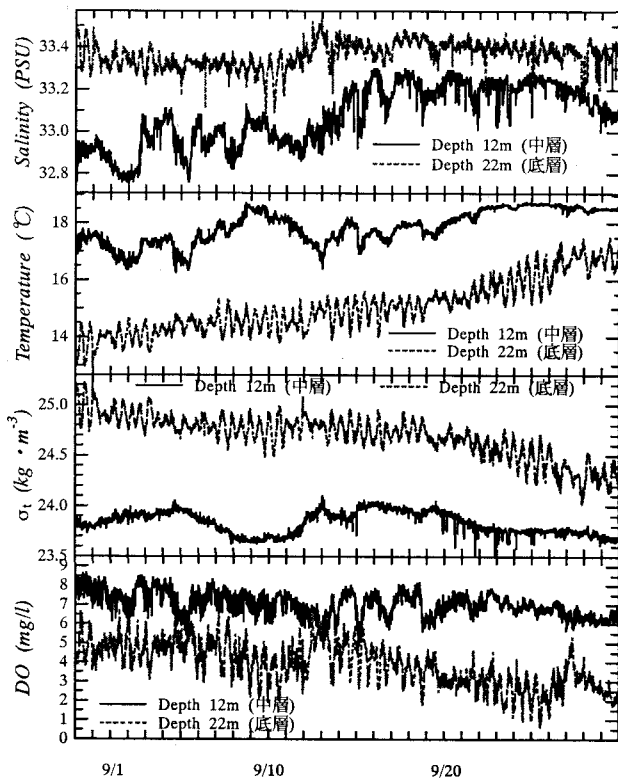


図-7 Stn. Aの塩分、水温、 σ_t 、DOの時系列変化(2003/8/30-2003/9/29)。

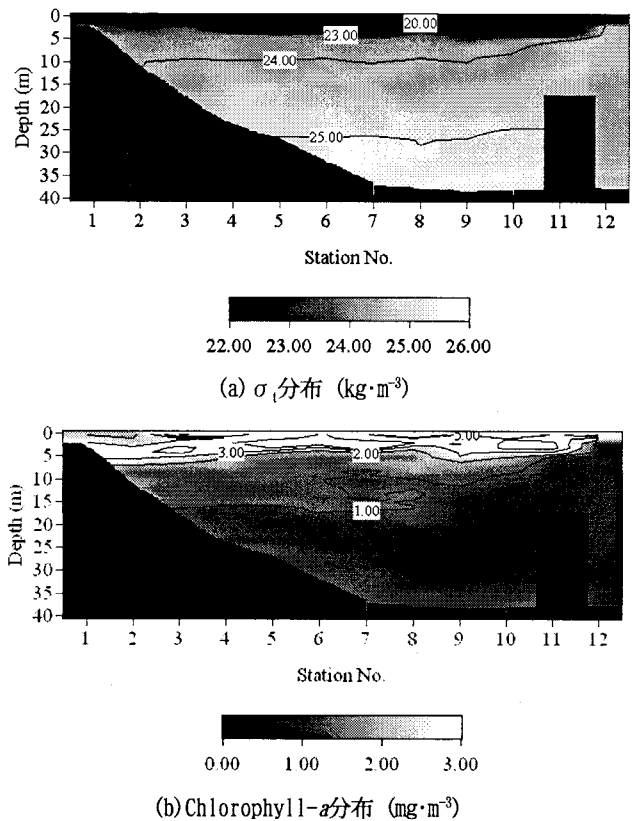


図-9 9月14日上げ潮時における大船渡湾内の σ_t およびChlorophyll-*a*分布

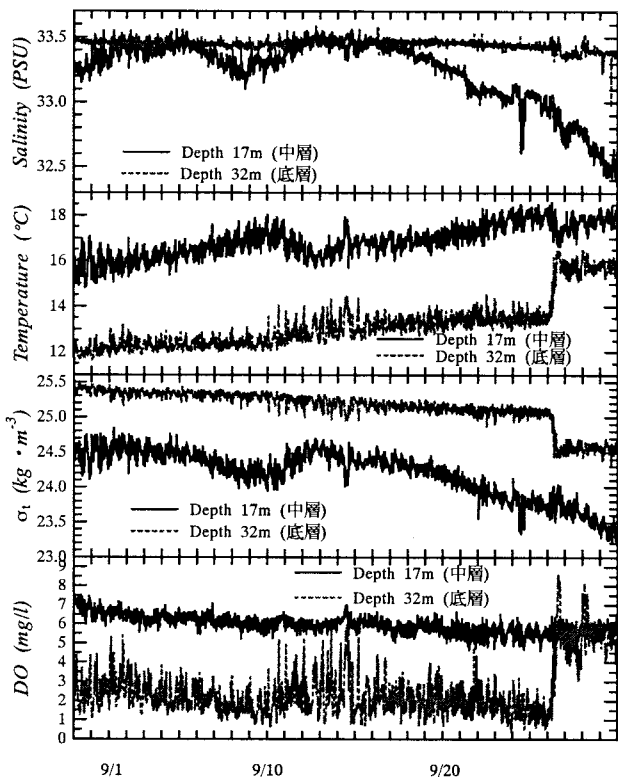


図-8 Stn. Bの塩分、水温、 σ_t 、DOの時系列変化(2003/8/30-2003/9/29)。

(2) 海水交換によるChlorophyll-*a*極大層への影響

海水交換による湾外水の進入状況とChlorophyll-*a*濃度分布変化をみるため、9月14日湾内の σ_t 分布およびChlorophyll-*a*濃度分布を図-9に示す。予想に違わず、中層Chlorophyll-*a*極大層が消滅しているのがわかる。このとき、湾内 σ_t は水深10-25mの広い範囲において $24\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 台であり、湾外水と同値である。また、河口~Stn. 6付近では若干Chlorophyll-*a*が水深15m以深まで分布しているものの、それより湾口側では、Chlorophyll-*a*濃度が $1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ のコンターと σ_t が $24.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ のコンターが一致していることから、湾外水の湾内への進入により、Chlorophyll-*a*が湾外へ排出されたと考えられる。

続いて、8月29日と9月14日の2時期において、栄養塩類濃度の比較を行うため、中層のChlorophyll-*a*極大層における、栄養塩類によるChlorophyll-*a*増殖制限項を算出した。(2)~(4)式に示すとおり、Michaelis-Menten式を用いて窒素、リンの制限項、 F_N 、 F_P をそれぞれ求め、小さい方を栄養塩類制限項 F_n とした。なお、 K_N 、 K_P の値としては、藤原らが伊勢湾の一次生産量分布算定に用いた $0.024\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 、 $0.006\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の値を用いた¹³⁾。

$$F_N = \frac{DIN}{K_N + DIN} \quad (2)$$

$$F_P = \frac{DIP}{K_P + DIP} \quad (3)$$

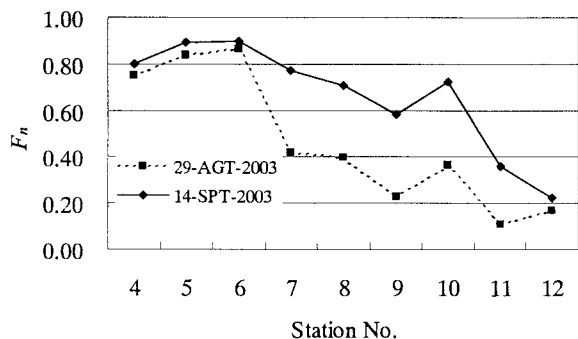


図-10 中層の極大層における栄養塩類によるChlorophyll-a増殖制限項分布. Stn. 4~6, 11は底層栄養塩類濃度, Stn. 7~10, 12は中層栄養塩類濃度を用いて算出している.

$$F_n = \min(F_N, F_P) \quad (4)$$

DIN : 溶存態無機窒素, DIP : 溶存態無機リン,
 K_N : 窒素の半飽和定数, K_P : リンの半飽和定数

この結果, Chlorophyll-a極大層が形成されている8月の方が F_n は高いことが予想されるが, 予想に反して9月の方が高いことがわかる(図-10). 海水交換による底層栄養塩類の巻き上がりの影響と考えられ, 条件が許せばChlorophyll-a層が再び発達する可能性もある. したがって, 海水交換による栄養塩類の巻き上がり等の影響も正しく把握することが必要と考えられる.

5. まとめ

本研究では, 三陸沖の σ_t 分布流況をSST分布図より把握し, 海水交換との関連性, また, 海水交換発生によって発生した水質構造の変化について明らかにした.

主要な結果を以下に示す.

(1) 2003年の大船渡湾沖の σ_t 変動は, 主として水温変動によるものであることから, 2003年9月のSST分布図より σ_t 分布図を作成した.

(2) この σ_t 分布図と湾内 σ_t 分布の実測データと照らし合わせ, 海水交換は底層で発生する可能性はあまりないと予想をたてることができた. 海水交換発生後の16日は, $24.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ と高密度の親潮第一分枝の三陸沿岸への接岸が確認された. 現地の時系列水温, 塩分観測データも含めて考えると, 主に湾内中層部での海水交換の発生が示唆され, 予想の正しさが証明された.

(3) この海水交換によるものと思われるChlorophyll-a分布構造の変化を確認した.

今後は, 親潮, 津軽暖流, 黒潮の混合特性を明らかにすることで, 塩分変動の季節変化を把握することが必要

である. これにより, 三陸沿岸の閉鎖性内湾域の海水交換予測が可能となるものと期待できる.

謝辞: 本研究を進めるにあたり, 科学研究費補助金基盤A(代表: 澤本正樹), 文部科学省学術フロンティア推進事業(日本大学工学部): 研究課題「中山間地及び地方都市における環境共生とそれを支える情報通信技術に関する研究(研究代表: 小野沢元久)」の援助を得た. また, 宮城県水産研究開発センターから1997~2003年度の大船渡湾沖におけるCTD定点観測データの提供を賜った. ここに記して謝意を示す.

参考文献

- 1) 秋山秀樹, 柳哲雄: 宿毛湾における水温急変現象の機構, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 22, No. 1, pp. 61-66, 1984.
- 2) 松山優治, 岩田静夫, 細田昌広: 相模湾における流れの観測, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 18, No. 1, pp. 9-17, 1980.
- 3) Takeoka, H. and T. Yoshimura: The Kyucho in Uwajima Bay, J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 44, pp. 6-16, 1988.
- 4) 長尾正之, 橋元信裕, 今村文彦, 首藤伸夫: 衛星データを用いた湾内海水交換予測の可能性について, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 921-924, 1992.
- 5) 長尾正之, 今村文彦, 張旭紅, 渡辺健二, 首藤伸夫: 成層構造を有する内湾での水温急変についての現地観測, 海岸工学論文集, Vol. 40, pp. 991-995, 1993.
- 6) 日比野忠史, 豊田政史, 深和岳人: 大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構, 水工学論文集, Vol. 43, pp. 1073-1078, 1999.
- 7) 岡田知也, 中山恵介, 日比野忠史, 細川恭史: 大船渡湾における湾外水の密度変動が湾内水環境に及ぼす影響の定量的評価, 港湾技術研究所報告, Vol. 39, No. 2, pp. 73-98, 2000.
- 8) 日比野忠史: 北西太平洋での水位振動と親潮南下, 水工学論文集, Vol. 45, pp. 1075-1080, 2001.
- 9) 日比野忠史, 豊田政史, 西守男雄, 細川恭史, 鶴谷広一: 海面水位の変動が内湾域への水環境に及ぼす影響—大船渡湾での貧酸素水塊の形成と消滅機構—, 港湾技術研究所報告, Vol. 38, No. 3, pp. 91-124, 1999.
- 10) 日比野忠史, 鶴谷広一: 日本沿岸海域における気圧配置と海面水位との相関関係: 内湾域への環境影響, 水文・水資源学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 148-158, 1999.
- 11) 花輪公雄, 岩坂直人: 冬季三陸沿岸域への親潮系の水の接岸と水温予報の試み, 月刊海洋科学, Vol. 19, No. 1, pp. 53-59, 1987.
- 12) D.M. Conlon: On the Outflow Models of the Tsugaru Warm Current, La mer, 20, pp. 60-64, 1982.
- 13) 藤原建紀, 山尾理, 高橋鉄哉, 笠井亮秀, 杉山陽一, 原田一利: 一次生産量の時空間分布の算定手法, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 1211-1215, 1999.

(2004. 9. 30 受付)