

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

長尾正之*・今村文彦**・張旭紅***
渡辺健二****・首藤伸夫*****

1. はじめに

沿岸海域での産業や生活活動が活発化する中、その環境状態を的確に把握し、維持・回復することは重要である。水質改善の重要な項目である海水交換に関して、長尾ら（1992）は衛星データを利用した表面水温の観測により湾内水温の急変現象を観測及び予測する手法を提案している。この急変機構については、松山ら（1992）は相模湾の急潮に際して、低気圧通過にともなう強い北風によるエクマン輸送で沖合いの暖水が沿岸域に移動し、この暖水の移動が急潮の原因となったケースを報告している。また、磯田・村山（1990）は、風によって励起される陸棚波の存在に着目し、数日程度の長周期波動との関連を述べている。このように水温の急変には、海流の移動とともに低気圧の移動による外洋での風も関係がありそうである。

そこで本研究では、この急変現象を湾内及び沿岸域での表面水温及び水温鉛直構造を対象にして観測し、さらに、流速観測や海況・気象データを加え、急変現象の発生機構について考察した。

2. 解析に用いたデータ

本研究の対象となった内湾は、図-1に示す三陸沿岸に位置する宮城県志津川湾である。内湾を取り巻く環境として、海流、潮流、水温の成層化、気象を取り上げ、それぞれの現地観測及びデータ収集を行った。期間は1992年の8、9月である。

海流については東北画像データベース TIDAS の NOAA 衛星の熱赤外画像と漁業情報サービスセンターの漁海況速報の表面水温データを用いた。いずれも、広範囲での水表面温度分布が得られ、海流の動きをモニターするのに都合がよい。

内湾においては、湾口（荒砥）と湾奥（弁天崎）2定点に小型水温計を鉛直方向に設置し、水温鉛直構造のデ

ータを収集した。また、沖合いについては、岩手・宮城両県の水産試験場の沖合定線データを使用した。その定線の位置を図-1に示す。湾内流況の観測は、湾口（荒砥）と湾奥2定点（弁天崎、荒島）に電磁流速計を設置して行なった。また、湾奥（図-1）に設置した水位計により潮位の観測を行なっている。気圧配置などの気象データは、アメダスデータや気象協会から提供されている天気図である。

3. 急激な海水交換現象例

3.1 急水温上昇が見られた8月21日の例

図-2は8月21日前後の水温成層変化と潮位変化である。水温変化図の縦軸は、海底からの高さを表している。これを見ると、8月21日の昼ごろにかけて、水温が表層12m付近までの間で急激に上昇し、一日足らずでまた元の水温に回復していることがわかる。

この現象は表層で顕著に観測された。湾奥のデータも併せ、水温時系列にピークがあらわれた水深だけを考えると、その暖水塊の厚さは湾奥では少なくとも7m、湾口では12mに達していたと推定される。

図-3は同時に測定した荒島の流速計の記録を示して

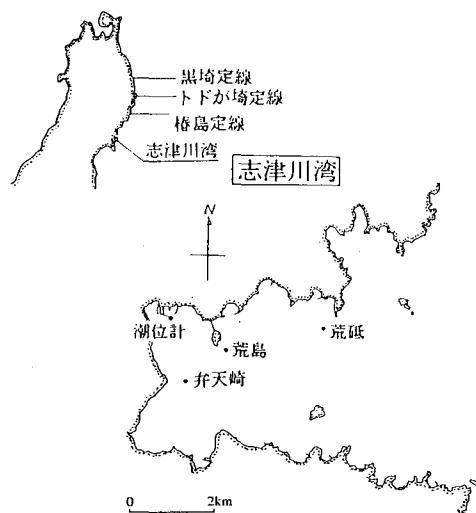


図-1 志津川湾の位置と沿岸定線および水温、流速観測地点

* 正員 工修 東京工大助手 大学院総理工学研究所
** 正員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター
*** 正員 工博 東北大学助手 工学部災害制御研究センター
**** 学生員 東北大学大学院
***** 正員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター

いる。8月21日の水温が急上昇をした頃を境に、流れは東向き最大6 cm/s から西向き6 cm/s に転じている。しかも、この流速は通常見られる値より大きく、その周期は潮汐より長い3日程度となっている。この湾での潮汐に起因した流れでは北東方向から侵入し、湾奥で反時計周りに回転して南東方向へ出るという形態が一般的であることから考えると、この時の流れは潮汐に起因したものではないと言える。図-4には、荒島で得られた流速データを基に痕跡線 (Streak line) を描いた。流れの反転が見えると共に、水温が急変した時点でループを描いていることが分かる。これは流れ方向に急激な変化が生じた事を示している。

ここで、暖水塊の移動速度を推定する。荒島と弁天崎で測った水温記録の極大値出現の時間差と、2点間の距離を使い、その移動速度を見積ると12 cm/s となった。一方、Benjamin (1968) や永田 (1982) は湾内に侵入する密度フロントの移動速度 C を次のように導いている。

$$C = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} H} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 g : 重力加速度、 $\Delta \rho / \rho$: フロントと周囲流体の相対密度差、 H : 水深である。いま、湾の平均水深として湾奥部の値10 mを採用し、相対密度差として0.13%とすると、移動速度は18 cm/s となる。この値は先ほどの暖水の移動速度の実測値とほぼ一致し、8月21日の水温急上昇は密度流として解釈でき、(1)式で扱えることがわかった。理論値の方が幾分大きいのは秋山・柳 (1984) の結果と同様であり、湾奥方向の海岸の影響であると思われる。

この時の三陸沿岸の海況を、NOAA 画像と漁海況速報で見たものが図-5である。8月21日から26日にかけて三陸沿岸にあった親潮第一分枝が、26日から31日の海況図では大きく北に後退し、その速度は約44 km/日 (0.51 m/s) に達していた。つまり8月21日から31日の間に、三陸沿岸では表層で親潮と黒潮の勢力が入れ替わり、沿岸域に暖水が接近したと言えそうである。

3.2 急水温低下が見られた9月3日の例

図-6には、9月1日から7日の水温変化と潮位変化を示す。9月3日から5日にかけて、潮位変化に応じて等温線が振動し、全層にわたって水温が低下していることがわかる。また、9月6日から7日の等温線間隔が広がっていることから、海水交換による上下層の混合が起こったことがわかる。この現象は、上層を暖水が移動した8月21日とは対照的に、下層から温度の低い外洋水が侵入したようである。

さらに図-7に示す流速データをみると、荒島では水温極小値をとる3日21時を境に、8月21日の場合と同じ流れが東向きから西向きに転じている。しかも、潮位

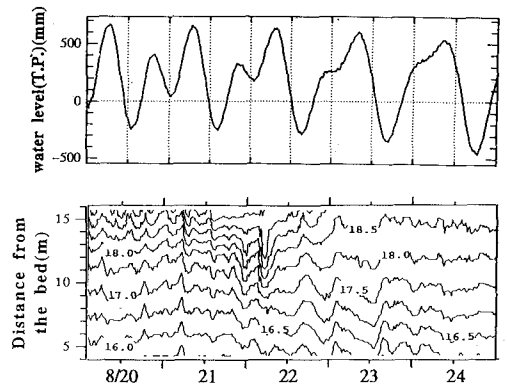


図-2 8月21日前後の水温分布と潮位変化

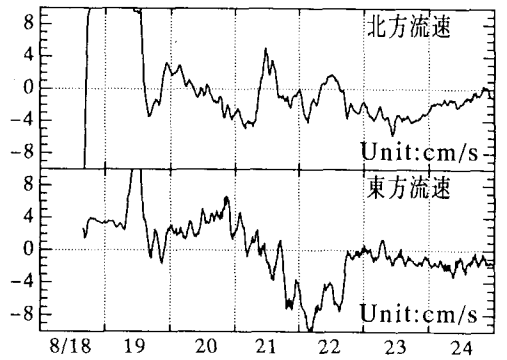


図-3 8月21日前後の流速記録 (荒島)

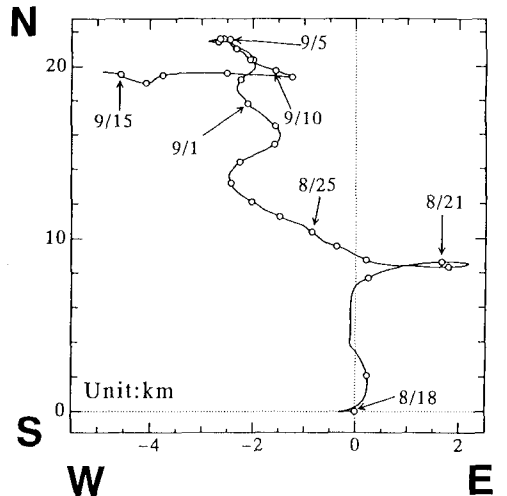


図-4 痕跡線

データを見るとわかるように、両イベントとも半日潮が弱まり一日潮が卓越しつつあり、潮差が小さい小潮の時である。このときの底層からの密度フロントの移動速度を前節と同様の手法で、荒島と荒砥間の水温記録から見



図-5 8月21日-25日の表面水温(左)と
8月26日-31日の表面水温(右)

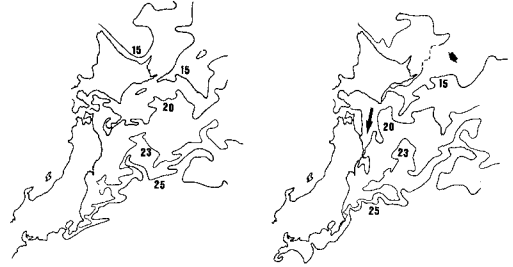


図-8 9月1日-4日の表面水温(左)と
9月6日-10日の表面水温(右)

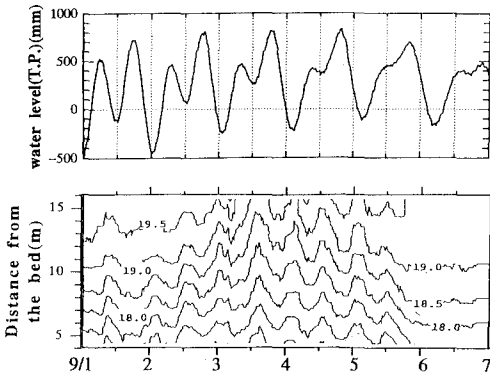


図-6 9月3日前後の水温鉛直分布と潮位変化

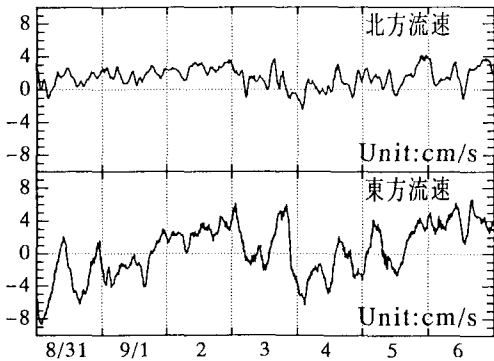


図-7 9月3日前後の流速記録(荒島)

積ると、やはり 12 cm/s 程度となった。

前節と同じく漁海況速報により三陸沿岸の海流配置をみると、9月1日から9月5日にかけて三陸沿岸を広く覆っていた暖水が、9月6日から10日にかけて親潮第一分枝の南下により南側に押しやられていることがわかる(図-8)。この第一分枝の南下速度は、約 59 km/日(0.68 m/s)であった。つまり、9月1日から10日の間に、三陸沿岸の表層水はなんらかの原因で南に南下させられ、それに対応して深層の親潮フロントが沿岸に接近し、底層からの海水交換を引き起こしたと言えそうである。

4. 水温急変動の現象に関する外因

4.1 気象データと海況との対応

日本気象協会から提供された天気図を図-9に示す。急水温上昇が見られた8月20日には西から前線が通過すると共に、台風9214号崩れの低気圧が鹿児島灘沖から三陸沖へ移動していた。また、急水温低下が見られた9月2日には、北海道を中心に980 mbの低気圧が発達し、北向きの強い風速が生じていた。

低気圧と表面水塊の移動を考える場合にはまず風送流を見積ればよい。ここでの風速(U_s)は気圧配置から生じる地衡風と考え以下の式から算定する(Tennekes・Lumley, 1983)。

$$U_s = dp/dL \cdot 1/\rho f \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ρ : 大気密度 ($1.18 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$)、 f : コリオリパラメータ (緯度 40° の場合、 $9.372 \times 10^{-5} \text{ 1/s}$)、 dp/dL : 気圧傾度。

竹内・近藤(1981)による風速と海表面の水流速(v)の関係である $v/U_s = 0.04$ を用いると、表面流速は8月21日に最大値 0.48 m/s(南東)、9月3日に 0.60 m/s(北西)となる。これは、衛星データなどから推定された親潮の前進速度 0.51 m/s と後退速度 0.68 m/s とほぼ同じ値をとることがわかる。従って、低気圧による風送流が沖合いでの水温分布に強く影響したものと考えられる。特に、9月の場合、風送流が親潮を南下させるのに効果があったと思われる(図-10)。台風通過後の相模湾での水温変化は、松山ほか(1992)により報告され、通過後による陸棚波と内部ケルビン波の発生により、表面水が沿岸に押し寄せたとして説明されている。本ケースではこれらの影響を議論するデータを得ていない。

4.2 沿岸域での水温構造

9月始めには、沖合い定線観測が行われており、その結果を図-11に示す。この時の沖合い定線観測により水深 50 m から 100 m にかけ親潮による低温水塊、海岸沿いの浅海部には暖水水塊が存在した。従って、8月21日過ぎに見られた黒潮の北上は表層での侵入に限られたも

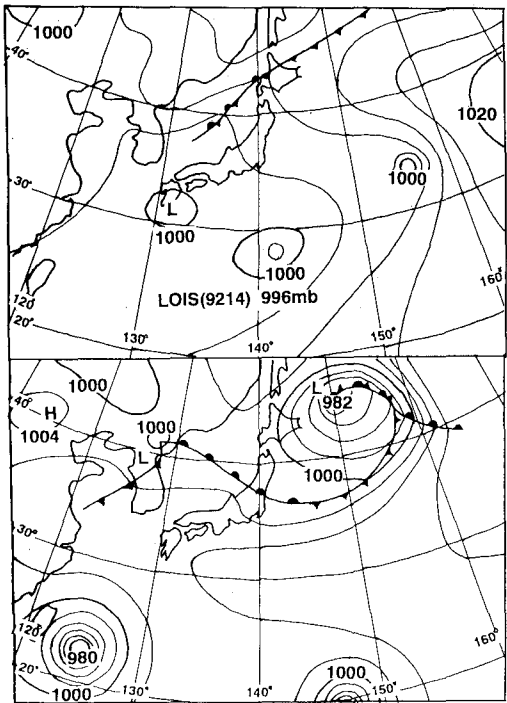


図-9 8月20日の気圧配置(上)と
9月3日の気圧配置(下)

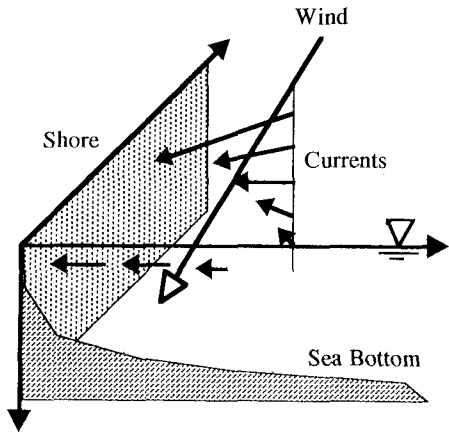


図-10 風によるエクマン輸送

のであろう。この表層が北西風または北風によって移動することにより、9月3日頃の親潮南下が急速かつ広範囲に生じたものと思われる。

5. 潮位変化と海水交換

前章までの考察から、急激な海水交換には、密度フロントの接岸が関係していることがわかった。さらに3章では、海水交換発生は潮汐とも関連することが認められていた。

これらを踏まえて、図-12に定義された無次元量を使って潮位変化と水温変化の対応を示したものが、図-13である。縦軸には、低高潮と高低潮の差(b)を高高潮と低低潮との差(a)で割ったパラメタ T_r をとった。 T_r が大きいと半日周期が卓越し、また小さい場合には日周期が卓越していると言える。横軸には高高潮と低低潮の差を鮎川における朔望平均満潮位と干潮位の差で割って無次元化した無次元潮位振幅 η^* をとった。この値が大きい場合には、潮が大潮であると言え、一潮汐行程は大きくなり潮汐にもとづく海水交換は起き易いと考えられる。図-13には、5月におこった水温観測結果も含め、ある3台の水温計の記録から、一潮汐変化の間の水温差が0.5℃以上のものを黒丸で示した。これによると、 $T_r:0.1$ から0.5、 $\eta^*:0.4$ から0.8の間に、水温の変化の大きい事象が集中しており、海水交換の起きる潮位パターンはある程度限定されるであろうということが言える。また、

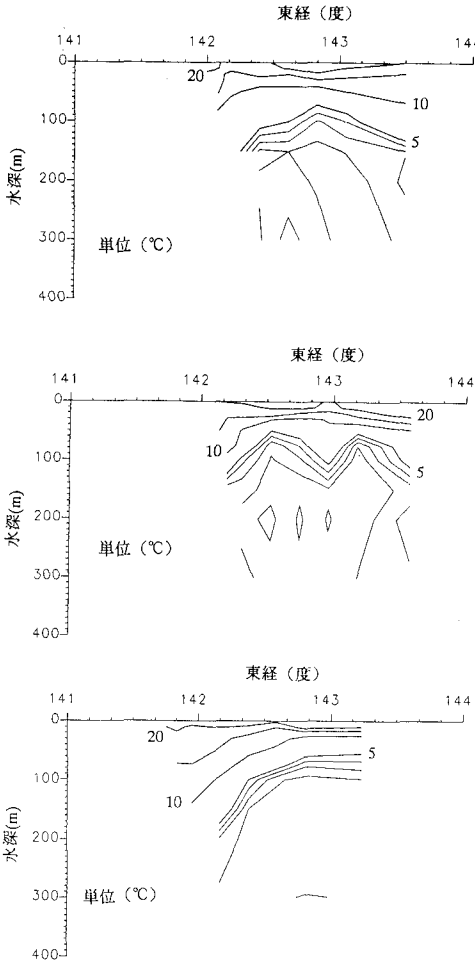


図-11 岩手水試による沖合定線観測(黒崎(上)、トドヶ崎(中)、樺島(下))

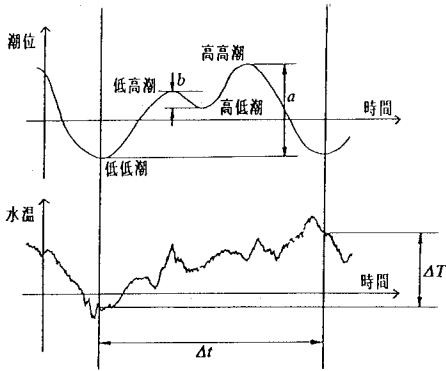


図-12 無次元量の定義

潮位の振幅よりも、日潮不等の大きさが海水交換に影響していると言えそうであり、これは今後の検討課題である。

6. おわりに

1992年8月から9月の鉛直水温データや気象データなどを中心に、海水交換現象を総合的に検討した。以下に、得られた主要な結論を示す。

内湾を対象とした水温観測の結果、湾の表層を移動するフロントと、それとは対象的に下層から上層にかけて侵入するフロントの二つの移動を観測することができた。また、これらの現象は、低気圧の移動に伴う風のために、海流フロントが移動したことが関係していた。特に9月の水温低下は、エクマン輸送により親潮フロントが岸に近づいたために生じたものと考えられる。こうした湾外での変化は、潮汐の効果が小さい時期には容易に湾奥まで到達しうることが今回の調査から判明した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、宮城県志津川町から

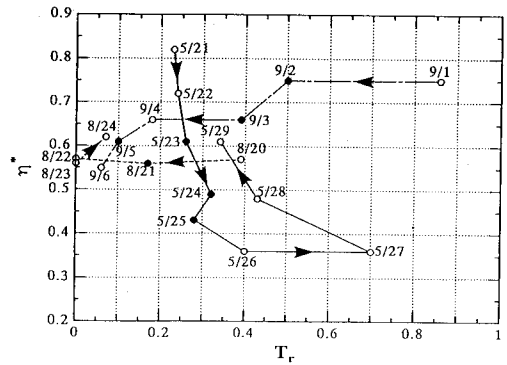


図-13 潮位変化と海水交換

全面的な協力を得た。また、水温データの提供を岩手県水産試験場と漁業情報サービスセンターより受けた。本論文の公表にあたり小川記念基金の補助を受けた。ここに記して感謝する。また、本研究の一部は、文部省「民間などとの共同研究」の成果であることを付記する。

参考文献

- 秋山秀樹・柳 哲雄 (1984): 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, pp. 61-66.
- 磯田 豊・村山達朗 (1990): 浜田沖の底部冷水と対馬暖流の流動構造, 沿岸海洋研究ノート, 第28巻, 第1号, pp. 85-95.
- 竹内清秀・近藤純正 (1981): 地表に近い大気 第7章 海洋混合層と大気, 大気科学講座, 東京大学出版, 226 p.
- 永田 豊 (1982): 湾内水温の急変現象と外洋条件, 沿岸海洋研究ノート, 第19巻, 第2号, pp. 103-111.
- 松山優治・岩田静夫・前田明夫・鈴木 亨 (1992): 相模湾の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第30巻, 第1号, pp. 4-15.
- Tennekes, H. and J. L. Lumley (1983): A first course in Turbulence, The MIT press, 300 p.
- Benjamin, T. B. (1968): Gravity currents and related phenomena, J. Fluid Mech., Vol. 31 Part 2, pp. 209-248.