

大船渡湾内の水温およびDO濃度変動に 与える沿岸境界流としての津軽暖流の影響

EFFECTS OF TSUGARU WARM CURRENT AS COASTAL BOUNDARY CURRENT ON THE WATER TEMPERATURE AND DISSOLVED OXYGEN IN OFUNATO BAY

佐藤博信¹・柏舘信子²・野村宗弘³・沢本正樹⁴

Hironobu SATO, Nobuko KASHIWADATE, 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 effect of Tsugaru warm current (TWC) to the variation of temperature and dissolved oxygen (DO) was investigated by field observation data and sea surface temperature (SST) derived from NOAA/AVHRR data in Ohfunato bay. From the field observation data, density intrusion, the phenomenon that outer seawater intrudes the same density layer in inner bay, was observed under stratified season in Ohfunato bay. Since outer seawater temperature was same at the middle layer in inner bay, seawater exchange occurred at the depth of middle layer. In August, we observed abrupt DO increase. It seemed to affect of density intrusion. However, this phenomenon did not affect broken of oxygen-deficient water mass because DO was consumed by seabed immediately. On the other hand, when typhoon passed through Tsugaru straight at the end of August, temperature changed abruptly with DO increase. From SST data, it was suggested that Oyashio affect this phenomenon.

In the end of oxygen-deficient water mass disappearance period, when temperature of the bottom of inner bay equal to that of outer seawater, DO changed largely. At that time, seeing SST data from satellite, the effect of TWC is weaker than in September and outer seawater is also low. Therefore, it was concluded that the strength and weakness condition of TWC is important for anoxic water disappearance.

Key Words : *seawater exchange, oxygen-deficient water, sea current pattern, stratification, density intrusion*

1. はじめに

多くの閉鎖性水域で、成層期に湾内底層部において貧酸素水塊が発生することが知られている。特に本研究で対象としている大船渡湾（岩手県南部）は、入り組んだ構造であるとともに、湾口部にチリ地震津波の教訓から津波防波堤が設置されたため、特に9月ごろにかけて密度成層が形成され、底層部では貧酸素水塊が発生することが豊田ら¹⁾によって確認されている。豊田らは、この強い密度成層の存在が鉛直混合を抑え、底層部の貧酸素水塊を底層に留める役割を持っていることを2層モデルにより示している。また、海水交換型防波堤により、富

栄養化した水塊を水域の上層部を経ずに湾外へ排出する手法に関しても言及している。

一方で、湾外水が流入する際に、湾内同一密度層を選択して流入する密度貫入が、貧酸素水塊、植物プランクトン濃度および水温など、各種水質に影響を与えていることが確認されている。特に、岡田ら²⁾は、密度貫入による海水交換は、通常の潮汐による海水交換（交換時間：約60日）と比較して交換率が高く、貫入による交換時間は1～3日であることを示した。また、鉛直一次元DOモデルを用いて、底層への密度貫入によるDOの突発的上昇を再現した。

一方、日比野ら³⁾は、同じく大船渡湾において、秋季に湾内水と比較して高密度の冷水塊が湾内底層部に流入、

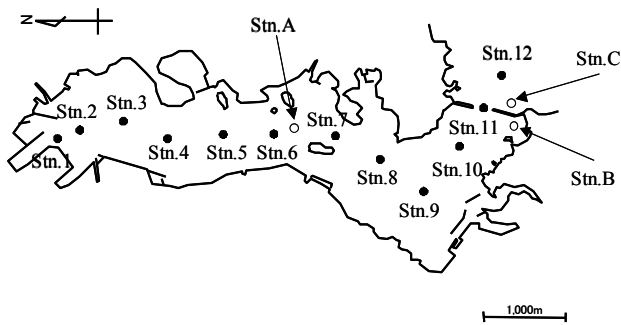


図-1 大船渡湾. Stn. 1-Stn. 12はスポット観測地点. Stn. A-Stn. Cは係留観測地点. なお, Stn. A-Stn. Cの水深は, それぞれ, 約38m, 約34m, 約20mである.

海水交換が発生し, 貧酸素水塊が消滅することを示した. また, 佐藤らは, 中層に浮遊している植物プランクトン濃度が, 密度貫入によって変化することを示し⁴⁾, それには親潮第一分枝の接岸の影響が考えられることを考察した⁵⁾.

以上のように, 湾外流況の変動は湾内の水質構造に影響を与えるために, 年間を通した湾内外の鉛直および時系列水質分布と, 流況との関連性に関する検討が必要不可欠である. 特に, 水温躍層形成に与える親潮冷水塊の影響に関する検討は大船渡湾でもされてきたが³⁾, 沿岸境界流として流れている津軽暖流と親潮の盛衰と湾内貧酸素水塊消滅に着目したものは見当たらない.

そこで, 本論では, 年間の鉛直密度構造と湾内外の時系列水温変動特性をはじめに整理し, 津軽暖流の盛衰状況と実測データと関連付けたいうえで, 津軽暖流が湾内水温とDO濃度変動にどう影響を与えているのかに関して考察を試みた.

2. 対象水域および現地観測の概要

(1) 大船渡湾の概要

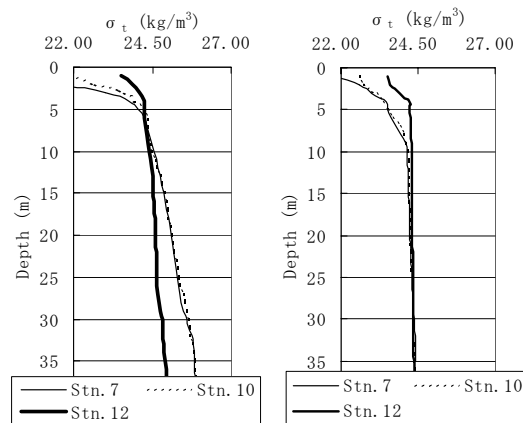
図-1に, 本研究において対象とした大船渡湾(岩手県大船渡市)を示す. 水表面積7.89km², 全長6kmの南北に細長い水域である. 1960年のチリ地震津波の教訓より, 1967年に湾口部に津波防波堤が建設された(湾口部の水深は約16m). この結果, 閉鎖度指標は13.1と他の水域と比較して高くなっている.

湾内は穏やかで, カキ, ホタテ, ワカメなどの養殖業が盛んである. 一方, 大船渡港が整備され, 舟運の拠点となっている. また, 湾奥部には二級河川盛川をはじめとする数本の小河川が流入している.

成層期には, 例年, 底層部ではDOが3mg/l以下の貧酸素水塊が観測される.

(2) 実測手法

実測は, 2004年5月末~2004年10月末の約5ヶ月間であ



(a) 7月23日 (b) 10月22日

図-2 上げ潮時における鉛直 σ_t 分布.

る. 月一度程度の頻度で, Stn. 1~12にて, TPM CLOROTEC (アレック電子社製)を鉛直方向に垂下させ, 水温, 塩分, 濁度を1m間隔において測定した.

また, Stn. A, Stn. Bにおいては, 水温塩分計(表層: 水面-1m, 中層: 水深/2m, 底層: 海底+2m), DO計(底層: 海底+2m), Stn. Cでは水温塩分計(水面-10m)を設置し, 10分間隔で連続観測を行った. Stn. Cにおいて, 水面-10mしか測定しなかった理由は, 湾外は波による乱れが大きく, 水深5m以深においては水温, 塩分ともになく考えて差し支えないことを水温, 塩分の鉛直プロファイルより確認できたためである.

3. 水質構造および水質時系列変化

図-2に上げ潮時におけるStn. 7, Stn. 10, Stn. 12の鉛直 σ_t 分布図を示す. 7月23日は貧酸素水塊が形成されている時期で, 10月22日は混合期で貧酸素水塊は既に消滅している.

7月は, 湾外水(Stn. 12)において, σ_t は鉛直方向にほぼ一定値を示している. しかし, 湾中央部(Stn. 7)および湾口部内側(Stn. 10)においては, 水深が深くなるにつれて, 湾外水の値より高くなっており, 底層への湾外水の貫入は発生しづらと考えられる. また, 7月23日は, 水深10mで湾内外の σ_t 値が等しい.

よって, 水深10mを中心に密度貫入が発生していると考えられる. これを確認するために, 図-3に7月23日の上げ潮時における σ_t および濁度の鉛直断面分布図を示す. 水深10mを中心とする層の濁度は湾外と等しく, さらにこの層の σ_t 値は湾外と等しくなっていることから, この時期に密度貫入が発生していることがわかる. また, これらの現象は, ADCPによる流動データからも確認されている⁶⁾.

図-2でも示した底層での密度差が何によるものかを見るために, 図-4に塩分および水温の鉛直分布を示す. こ

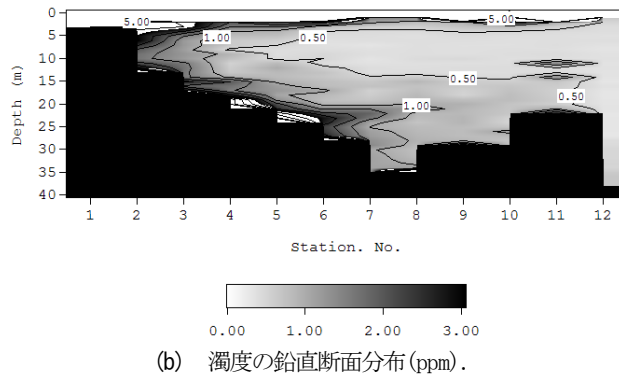
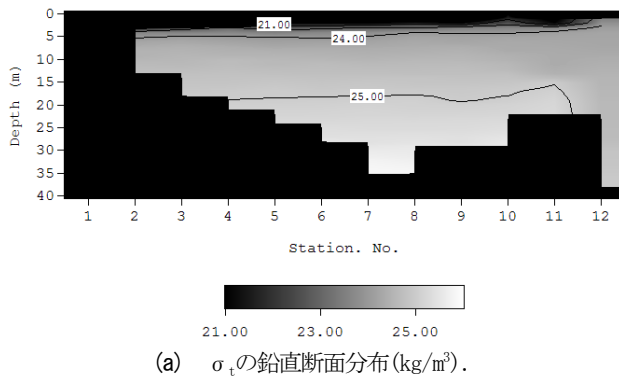


図-3 上げ潮時における σ_t および濁度の鉛直断面分布(いずれも7月23日).

れより、塩分は5m以深においてはほとんど一定で、密度差は水温によって左右されているのがわかる。また、湾外と比較して湾内は水温成層が形成されており、特に、7月23日の湾内水中層～底層については湾外水よりも低い、9月、10月と時間が経つに連れて、湾外水温と等しくなっていくのがわかる。

次に、図-5、図-6に各係留地点の時系列水温変化および大船渡測候所で観測された大船渡の日平均気温を示す。

Stn. A, Stn. Bともに、表層水温においては5月末から上昇を続け、8月上旬をピークに再び低下している。これは、大船渡の日平均気温と同じ傾向である。一方、中層、底層においては、8月上旬を過ぎても上昇傾向にあることが分かる。

しかし、表層水温は8月以降、下降しはじめ、中層とは10月1日に同値になり、次いで、10月16日には底層と同値になっている。このため、はじめに表層と中層で、成層が解けて上下の水質分布が一樣になる鉛直混合が発生し、その後、底層と鉛直混合が発生しているものと考えられる。

ここで、5月末において、湾内中層、底層および湾外の水温がほぼ同じであることに注目されたい。これは、表層以外は混合状態であり、かつ、湾外との交流があるためと考えられる。

また、成層期において注目すべき点は、湾内Stn. A, B中層と湾外水の変動傾向が同じであることである。このことは、湾外水密度は主に湾内中層と等しく、中層での

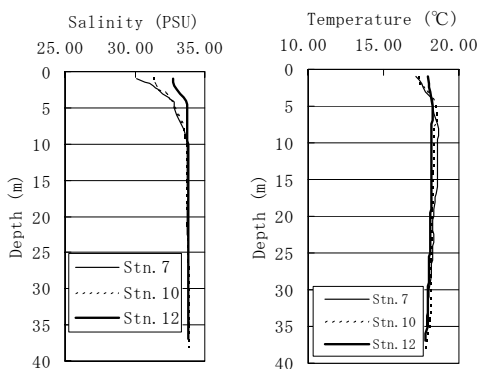
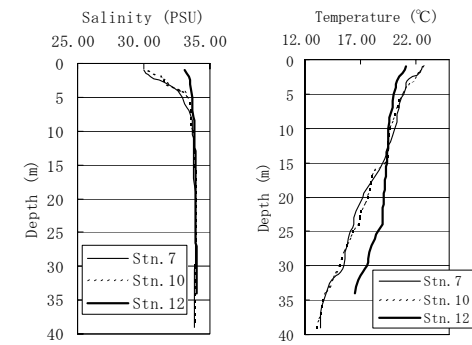
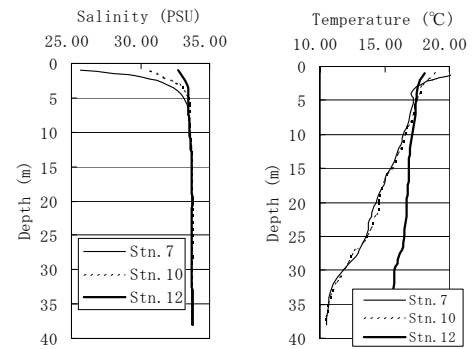
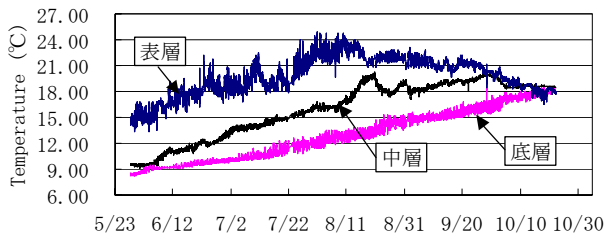


図-4 塩分および水温の鉛直分布 (すべて上げ潮時) .

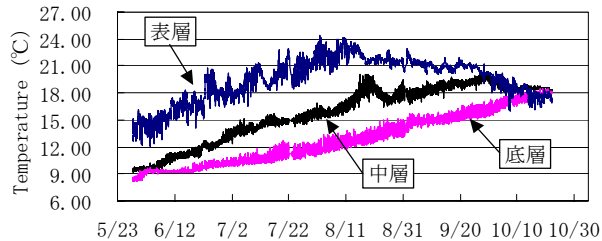
密度貫入が成層期に卓越していることを意味する。しかし、底層までは進入しないため、図-5からもわかるとおり、湾内底層は中層と比較して、水温上昇は遅く、密度も高くなっている。

次にDOについてであるが、図-7に示す底層DOの時系列変化より、Stn. A, Stn. Bの両地点とも貧酸素水塊が形成されており、湾内底層へ高濃度DOの湾外水が流入しにくくなっている様子がよくわかる。なお、Stn. BはStn. Aと比べて2m程度水深は浅い。両地点ともに貧酸素状態であるが、Stn. Bに関してはStn. Aと比較して多少、DOは高くなっている。水深が少々浅いことと、湾口部に近く、湾外水の影響を受けやすくなっているのが原因と見られる。

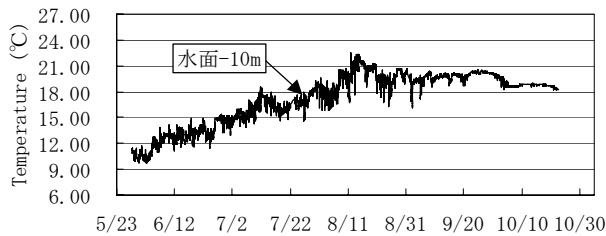
また、Stn. Bに関しては、しばしばDOの急上昇が見られる。これは密度貫入による現象であるとみられるが、



(a) Stn. A



(b) Stn. B



(c) Stn. C

図-5 各係留測点における水温時系列変化.

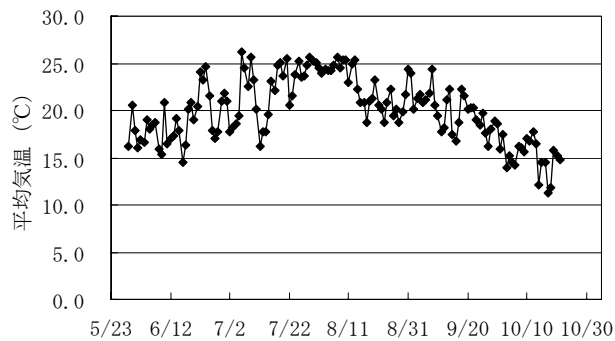


図-6 大船渡の日平均気温 (気象庁ホームページより) .

<<http://www.data.kishou.go.jp/index.htm>>

すぐに減少に転じており、底泥でのDO消費の影響が大きいためか、貧酸素水塊の解消にはいたっていない。

しかし、8月21日は、Stn. Bのみならず、Stn. AのDO濃度も上昇している。この日は前日に台風15号が津軽海峡を日本海側から太平洋側に抜けており、海面上昇など、流況になんらかの影響を与えたことが予想される。このため、日本画像データベース(<http://asiadb.cneas.tohoku.ac.jp/jaidas/>)より取得したNOAA/AVHRR熱赤外画像による、海表面温度 (Sea Surface Temperature;

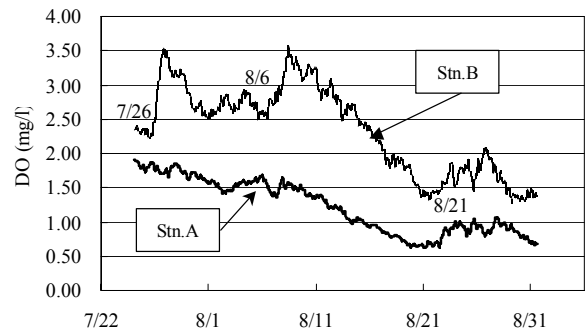


図-7 DO時系列変化 (底層) .

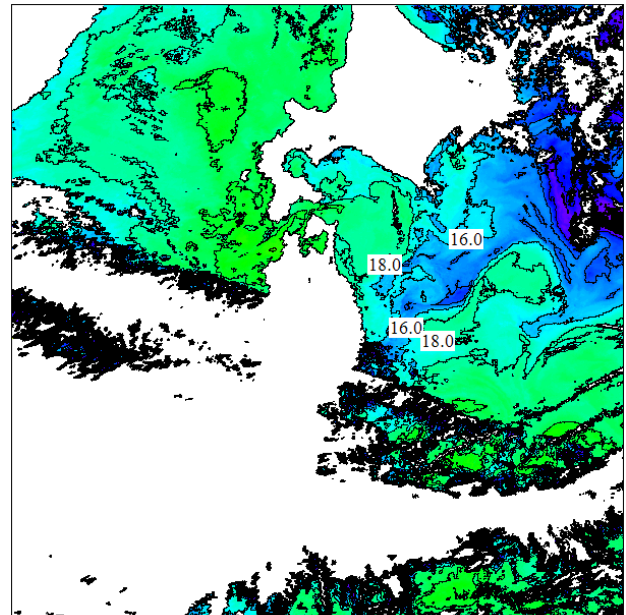


図-8 8月22日 (12時50分) の東日本のSST分布 (単位: °C) .

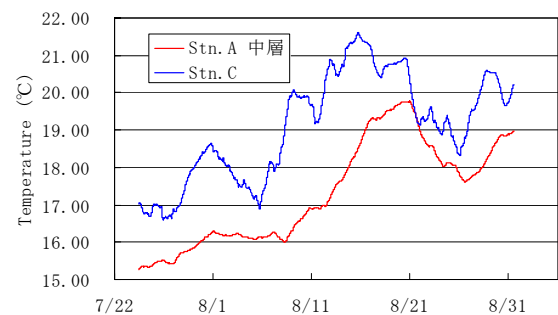


図-9 Stn. A中層とStn. Cの水温時系列変化.

SST) 分布図を図-8に示す。

この図より、親潮と見られる水塊が三陸沿岸に接近している様子が確認できる。

一方、実測データにも変化が見て取れる。図-9にStn. A中層とStn. Cの水温時系列分布 (25時間移動平均値) を示す。Stn. Aは8月初旬より上昇傾向にあったが、

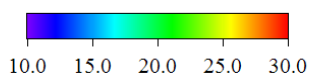
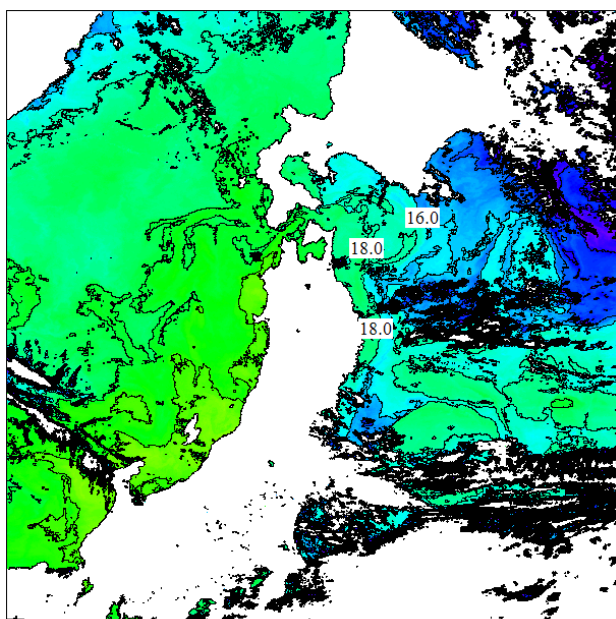


図-10 8月27日 (13時33分) の東日本のSST分布 (単位: °C) .

台風が通過した8月20日を境として26日まで低下している。一方で、湾外Stn. Cの水温も8月20日から26日まで低下している。ゆえに、親潮由来の冷水塊が接岸しStn. Cの水温が低下し、湾内にも貫入したためにStn. Aの水温も低下したものと見るのが妥当だと考えられる。一方、8月27日のSST画像 (図-10) では、親潮勢力も衰えてはいないが、再び津軽暖流が確認され、2°C程度水温は高い。27日以降の湾内外での水温上昇はこのためと見られる。しかし、残念ながら、気圧との関連性についての物理的考察をするに足る知見、データは得られなかった。

4. 貧酸素水塊の消滅

前章では、成層が発達している夏季の貧酸素水塊の挙動を見たが、ここでは、海流の影響が貧酸素水塊消滅にどう影響しているかを見るために、図-11に、秋季における底層部のD0時系列分布を示す。なお、観測地点は我々の実測したStn. Bと同じであるが、測定深度は海底+0.5mである。10月15日以降、D0が徐々に上昇した後、10月20～21日に突発的にD0が回復して、貧酸素水塊が回復している様子が確認された。

図-12にStn. B中層、底層およびStn. Cにおける水温時系列分布を示す。これより、Stn. B中層とStn. Cは10月初旬よりほとんど同値になっている。Stn. B中層とStn. Cでは水深差が8m程度あるので、少なくとも水深10～18mで湾内外で海水交換があるものと考えられる。そして、貧酸素水塊が消滅する際には、湾外と湾内底層の水温が同

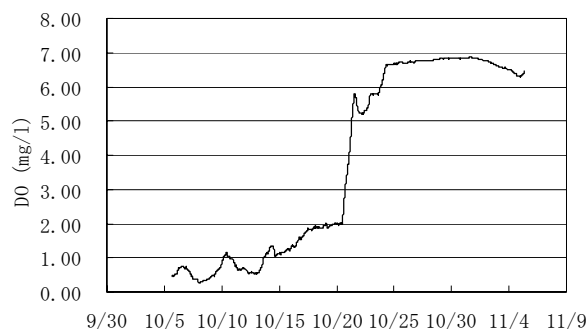


図-11 Stn. B(海底+0.5m)におけるD0時系列分布 (国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所により測定) .

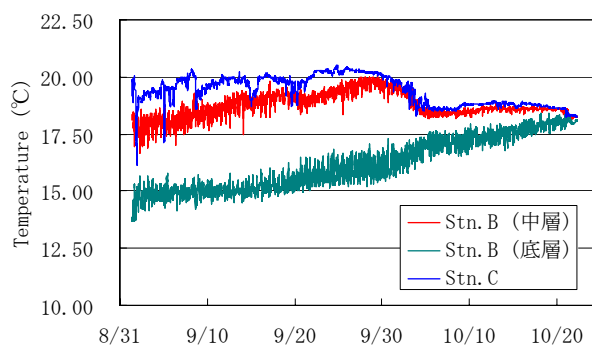


図-12 Stn. B底層部およびStn. Cにおける水温時系列分布.

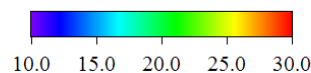
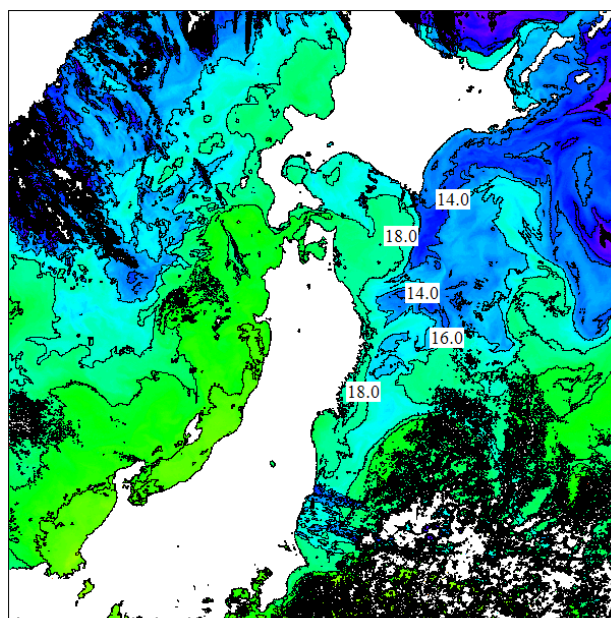


図-13 9月15日 (13時17分) の東日本のSST分布 (単位: °C) .

値になったときに湾外水が底層まで流入し、貧酸素水塊が完全に消滅するものと考えられる。

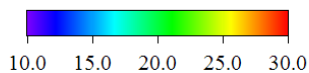
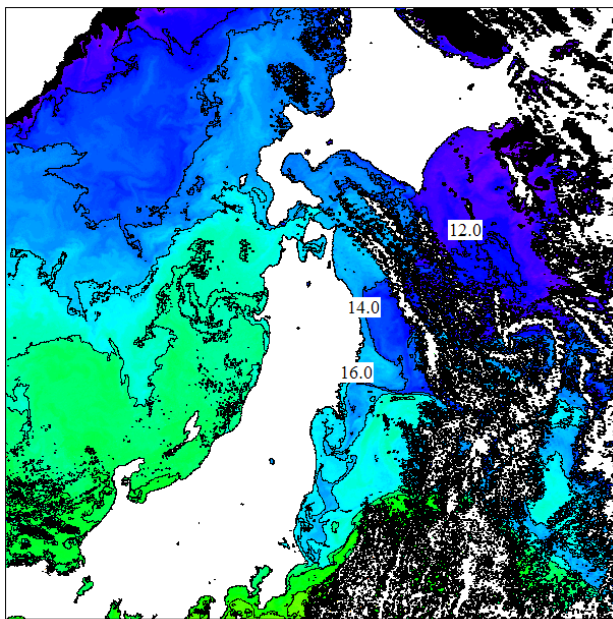


図-14 10月17日（13時53分）の東日本のSST分布（単位：℃）。

また、湾外水温をみると、10月初旬を境に、1℃程度低下していることが見て取れる（図-12）。この現象を見るために、9月と10月のSST分布図を図-13および図-14に示す。9月15日と10月17日は、どちらも三陸沖まで親潮が張り出しているが、9月は10月と比較して津軽暖流の勢力が強いため、水温も9月は10月より高い。その後、10月になると、勢力が弱まり、親潮系の冷水塊の影響が強くなり、津軽暖流層の水温も低下し、これが水温の低下に現れたものと見られる。論文中には貧酸素水塊消滅期に近い10月17日の図を掲載したが、10月上旬においても17日と同様であった。

以上より、津軽暖流の勢力の衰退が著しい際には、湾内外の水温が今回の実測よりも早い時期に同値になり貧酸素水塊の消滅が早まることもあり得るし、また、逆に勢力が活発な状態のままであれば、湾内外の水温が同値になる時期が遅くなり、貧酸素水塊の消滅時期が遅れることも考えられる。

5. まとめ

本論では、湾外の実測が湾内の密度成層および貧酸素水塊の消滅に及ぼす影響を観測によって検討した。

以下に主要な結果を示す。

- 1) 濁度および σ_t 分布図より、湾外水が湾内と同一密度層に流入する密度貫入の発生を確認した。
- 2) 湾内底層では湾内外において、10月中旬まで密度差があり、湾外水は湾内底層に流入しにくい。

- 3) 8月21日に、Stn. A, B両地点において、密度貫入によるものと見られるD0の突発的な上昇が観察され、このときのSST分布図より、親潮の影響が確認できた。しかし5日後には、津軽暖流の影響で再び湾外水温が上昇し、湾内水温も上昇している。よって、密度貫入による水質変化には親潮南下と津軽暖流の勢力の大小にも目を向けることが必要と見られる。
- 4) 2004年10月においては、9月と比較して津軽暖流の勢力が衰えているために、親潮水塊が近づきやすくなっている。したがって、津軽暖流の盛衰状況によっては、貧酸素水塊の消滅時期が変化する可能性がある。

以上、貧酸素水塊消滅に関しては、沿岸境界流としての津軽暖流と親潮の盛衰状況に着目する必要があると結論付けられる。

今後は、短期的な親潮南下や津軽暖流の盛衰と対馬暖流の勢力の関連性に関しても着目することで、貧酸素水塊の消滅機構が明らかになるものと考えられる。

謝辞：本研究は、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）」の一環として実施した。また、科学研究費補助金基盤A（代表：澤本正樹）の補助を受けた。盛川の流量は岩手県大船渡地方振興局土木部鷹生ダム建設事務所より、一部のD0データは国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所より提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 豊田政史，日比野忠史，西守男雄：大船渡湾での海水交換機構と自然力を利用した水質管理手法の検討，水工学論文集，Vol. 43，pp. 1079-1084，1999。
- 2) 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，港湾技術研究所報告，Vol. 39（2），pp. 73-98，2000。
- 3) 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（3），pp. 91-124，1999。
- 4) 佐藤博信，高橋研也，柏館信子，野村宗弘，沢本正樹：大船渡湾における密度貫入が中層Chlorophyll-a濃度に及ぼす影響，海岸工学論文集，Vol. 52，pp. 876-880，2005。
- 5) 佐藤博信，高橋研也，野村宗弘，沢本正樹：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，水工学論文集，Vol. 49，pp. 1315-1320，2005。
- 6) 高橋研也，佐藤博信，柏館信子，野村宗弘，沢本正樹：大船渡湾における水質特性と湾水制御効果の検討，海洋開発論文集，Vol. 21，pp. 373-378，2005。

（2005. 9. 30受付）