

大船渡湾における海水交換の定量評価

Quantitative analysis of seawater exchange in Ohfunato Bay

日比野忠史¹・竹内健太郎²

Tadashi Hibino and Kentarou Takeuchi

¹正会員 博士(工学) 広島大学大学院工学研究科助教授 社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

²学生会員 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

This paper deals with the seawater exchange caused by density gradient between the outer bay and inner bay using density profile around the bay mouth and velocity profile above the mound. It is revealed that the mechanism of seawater exchange is greatly influenced with the density intrusion depending on the horizontal density gradient. When the density of the outer bay is smaller than the inner bay, the seawater exchange occurs in the upper layer, and cannot be expected in the lower water. But, when the density of the outer bay becomes bigger than the inner bay, for example, after coming typhoon, seawater exchange is accelerated by two types of seawater exchange mechanism. One is intrusion of the outer bay water, the other is out flow due to internal wave.

Key Words: Mound, Intrusion, Internal wave, Flow rate, Density current

1. はじめに

大船渡湾(39°N, 141.75°E)の湾口部(水深約40m)には高さ約20mの捨石マウンドが設置され、湾内外が分離された形状にある。開口部にシル(マウンド)が形成された閉鎖性の湾においては、海水交換が悪く、富栄養化、貧酸素化等の水質悪化が懸念されている。大船渡湾においても、夏季に密度躍層が形成され(湾内では縦断方向にほぼ一様に密度が分布している)、低層の貧酸素化が観測されている(Fig. 1)。しかしながら、大船渡湾では、成層期においても低層水は停滞しておらず、潮汐、気象擾乱、海流等を外力とした流動が観測されている。

大船渡湾での密度躍層の形成・消滅は三陸沖に侵入する海流との関係が強いことがわかっている^{1, 2)}。三陸沖には6～9月頃まで親潮が南下するために、塩分の低い親潮系の水塊が湾内下層に侵入できず、密度躍層の形成が増長されている。秋～春期には黒潮に起因する高塩分水塊が湾内低層に侵入するとともに、湾内水温が放射冷却によって低下し、低層に高密度水塊が形成されているが、10月頃から親潮系水塊に代わり、黒潮系水塊が三陸沖に侵入してくると、塩分の高い黒潮系水塊が湾内下層に侵入するようになり、密度躍層の消滅を促進している。

本論文では、潮汐周期での湾口部周辺での流れについ

て検討するとともに、これまでに明らかにされた海水交換機構をもとに、湾口マウンド上で測定された流向・流速、水温・塩分プロファイルおよび湾内外で測られた水温・塩分プロファイルから、海水交換量を算出し、大船渡湾における海水交換率の定量的な評価を行った。

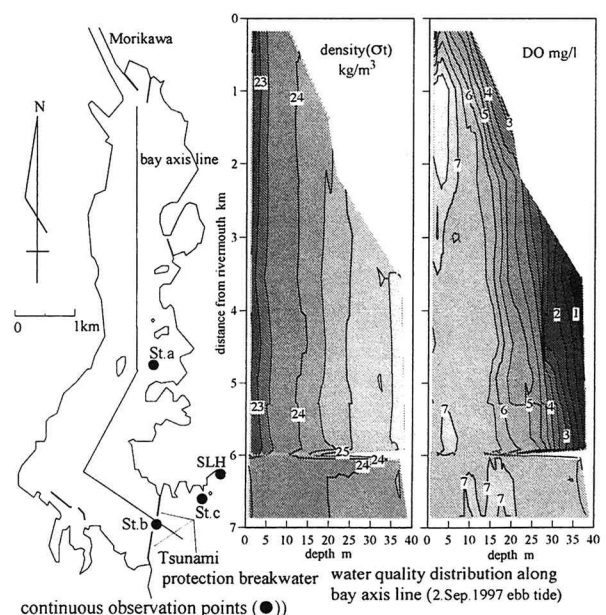


Figure 1 Plan of Ohfunato Bay, observation points and water quality distribution

2. 大船渡湾での貫入による海水交換機構

黒潮系の高塩分水塊は4月頃まで三陸沖に北浸しているが、5月頃になると親潮系の低塩分水塊が南浸してくる¹⁾。成層期である8~9月頃までは、湾外からの黒潮系(高塩分)水塊の流入する機会が少なく、かつ、低層水と中層水の混合が制限されるために低層水塊が貧酸素化が進行していく。しかし、気象擾乱等によって密度場が変化し、湾内中層水塊に比較して湾外の水塊密度が高くなると、酸素を多く含む湾外水が湾内中層以深に貫入することによって酸素の低層への供給が行われている^{3,4)}。Fig. 2に示されるように湾外水塊の密度が大きくなると、湾口部では湾外からの水塊が同レベルの水深へは流入せず、湾内の等密度水塊のある水深に貫入する。この現象によって、成層期においても湾内下層の海水交換が促進されている。

海水交換が貫入によって行われる場合には、湾外水の

貫入水深によって、その効率は大きく変化する。密度成層が強くなる成層期の低層における海水交換率を高めるためには湾内中層以浅の水塊密度が低下することが必要となる。湾内中層までの塩分濃度を低下させる最も重要な自然現象は降雨であるが、低気圧の種類・規模・経路によって湾内の密度分布が大きく変わることがわかっている¹⁾。Fig. 3は二つの異なる種類の低気圧の通過に伴って形成された湾内(st.a)での塩分と水温プロファイルおよび大船渡湾の

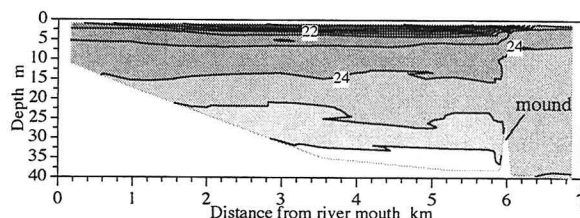
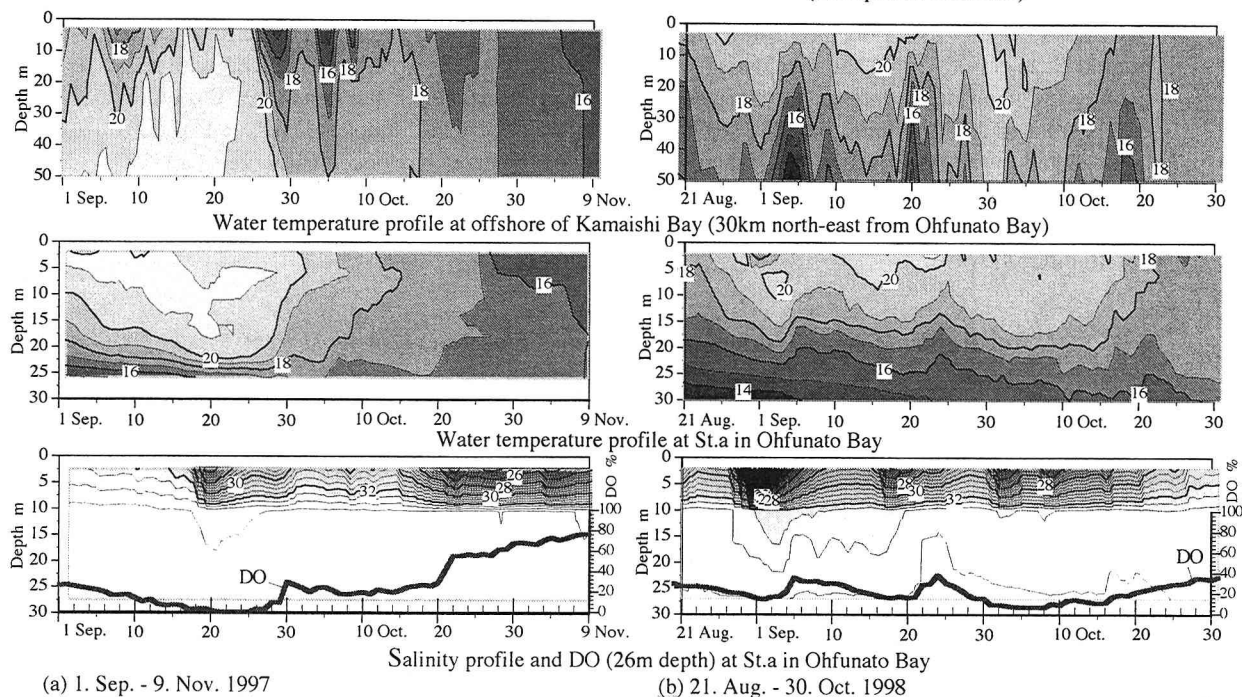


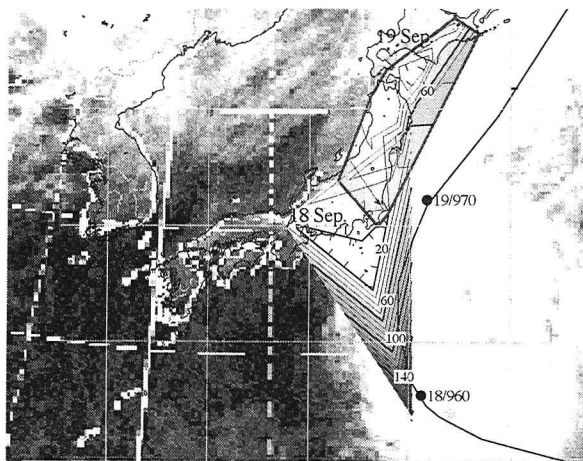
Figure 2 Density distribution along bay axis line (30.Sep.1997 flood tide)



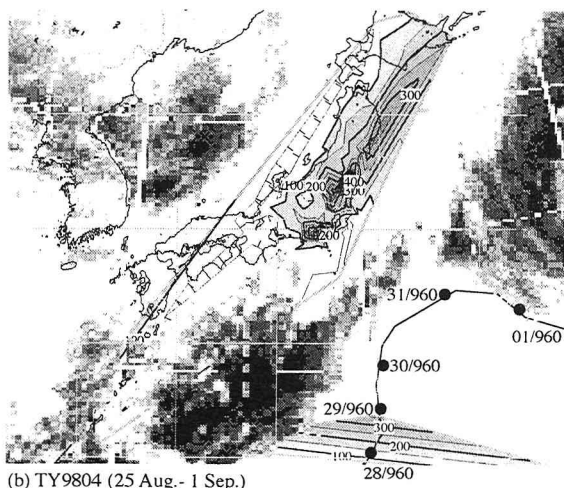
(a) 1. Sep. - 9. Nov. 1997

(b) 21. Aug. - 30. Oct. 1998

Figure 3 Time-series of salinity, water temperature profile and DO (26m depth) at Ohfunato Bay (St.a) and offshore



(a) TY 9720 (18-19 Sep. rainfall amount is separated two days.)



(b) TY 9804 (25 Aug. - 1 Sep.)

Figure 4 Cumulative distributions of rainfall and cloud, and Course of typhoons. Values given show Day/Pressure (hPa) at 09:00 JST

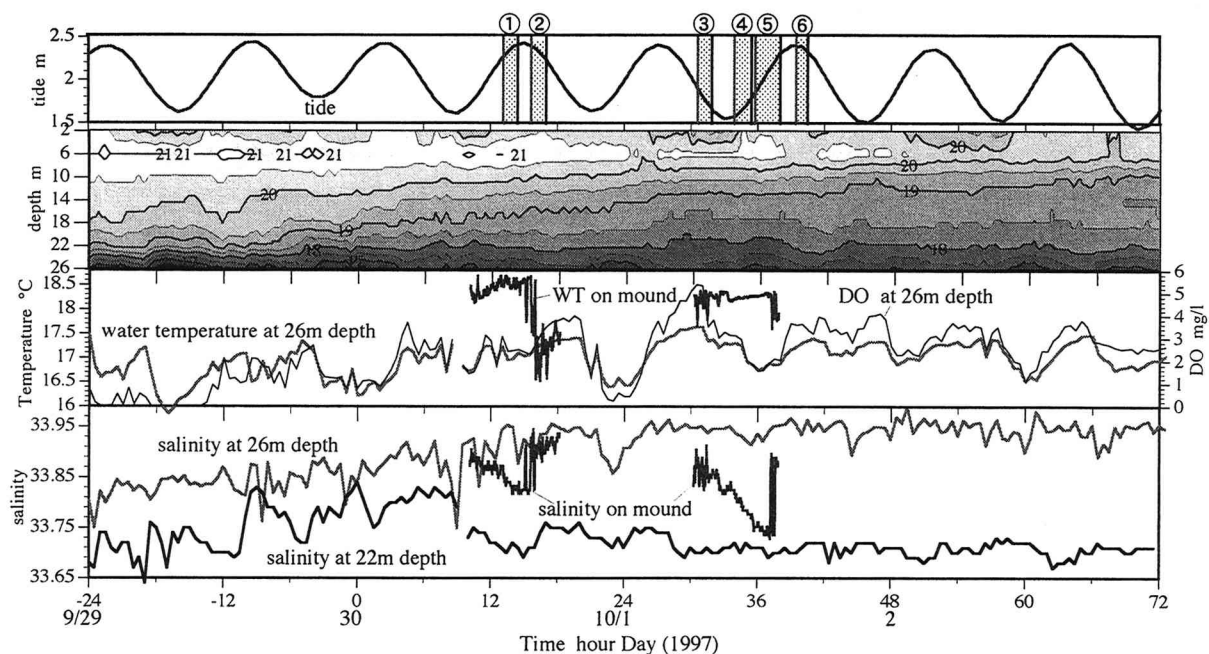


Figure 5 Time-series of water qualities and velocity at St.a or on the mound
(hatched areas in upper figure show the observation periods in Fig.5)

北東約 30km(釜石湾沖)での水温プロファイルを示した((a) 1997 年 9 月 1 日～11 月 9 日, (b)1998 年 8 月 21 日～10 月 30 日)ものである。Fig. 4 に台風が通過した(a)97 年 9 月 18～19 日(台風による降雨)と(b)98 年 8 月 25 日～9 月 1 日(台風によって刺激された前線による降雨)の台風経路, 降雨量の累積分布および雲の累積画像が示されている。降雨量と塩分変化からわかるように, 湾内に流入してくる淡水量は(b)の期間では(a)の期間の数倍になっているにも関わらず, (a)の期間に湾内の中～上層での水温の一様化が起こっている。釜石湾沖での水温プロファイルと比較すると, 97 年には台風の通過(高気圧の東偏)に伴って 20℃以上の水塊が三陸沿岸に到達していることがわかる。すなわち, 97 年は太平洋上を移動する台風(高気圧の東偏)とともに浸入してきた多量の高水温塊が, 海側から湾内に浸入したことによって中層(22m)以浅の水塊が等水温化している。これに対し, 98 年では陸域で降った降雨が湾内に流出し, 表層から 10m 程度までの水温に強い影響を与えているが, 外海側から高水温塊が流入した場合とは異なり, 中層以浅における水温の一様化は生じていない。

湾内下層での DO 上昇と外海水温プロファイルから 97 年は高気圧の東偏によって浸入した高水温塊が南下し(9/28 頃まで), 通常時に戻った外海水塊は大船渡湾内水塊よりも密度が高くなったこと, 98 年は低気圧移動後に低水温塊が三陸沖に浸入してきたこと(Fig. 3; 釜石湾沖 9/2 と 20 頃)によって湾外水塊が湾内中層以浅の水塊に比較して高い密度となり, 湾外水塊の湾内低層への貫入が起こっていることがわかる。どちらの場合も気象擾乱によって湾内中層以浅の水塊密度が低下し, DO の高い湾外水塊が湾内低層に貫入することで DO の上昇が起こっている³⁾。

3. 海水交換時の湾口周辺の流れ

本章以降では, 海水交換の定量評価を行うために, 潮汐周期で起こる湾口での流れについて検討を行う。

(1) 密度貫入による海水交換

Fig. 5 に 1997 年 9 月 29 日～10 月 2 日に湾内 St.a で測定された水温の鉛直プロファイル, 同地点 26m 水深の水温, DO, 塩分と潮位および湾口マウンド上で測定された水温, 塩分の経時変化が示されている。

Fig. 3(a) から 9 月 27～30 日までは 25m 以浅の水温低下と DO の上昇から, 低密度化した湾内中層以深に湾外水の貫入量が多いことがわかる。これに対して, 10 月 1～20 日には顕著な DO の上昇は起こっておらず, 中層以深への貫入規模は小さくなっていることがわかる。断面観測が行われた 9 月 30 日は中層貫入が継続している時期, 10 月 1 日は貫入が終了した時期である(Fig. 5)。湾内中層以深が低密度化した後の 9 月 27～30 日までは湾内に比較して高密度の水塊が三陸沖に浸入しており(Fig. 3), 湾内中層以深の水温を上昇させている(Fig. 5 では 26m 水深の塩分・DO が増大している)ことから, 湾外水の湾内低層への貫入が起こっていることがわかる。

(2) マウンド周辺での流れの状況

Fig. 6 に 1997 年 9 月 30 日と 10 月 1 日に湾口周辺(湾内～マウンド上～湾外)で縦断観測された水温, 塩分および DO の鉛直断面分布が示されている。Fig. 5 の潮汐図内にハッチされた期間(①～⑥)が観測時間に対応している。DO の上昇が起こっている時期(30 日)には上げ潮時に湾外水塊の湾内低層への貫入(Fig. 2), 下げ潮時には湾内低層水塊の湾外排出(Fig. 5 のマウンド上での水温・塩分, Fig. 6 の水温, DO 分布での湾内低層水のマウンド上への湧昇状況

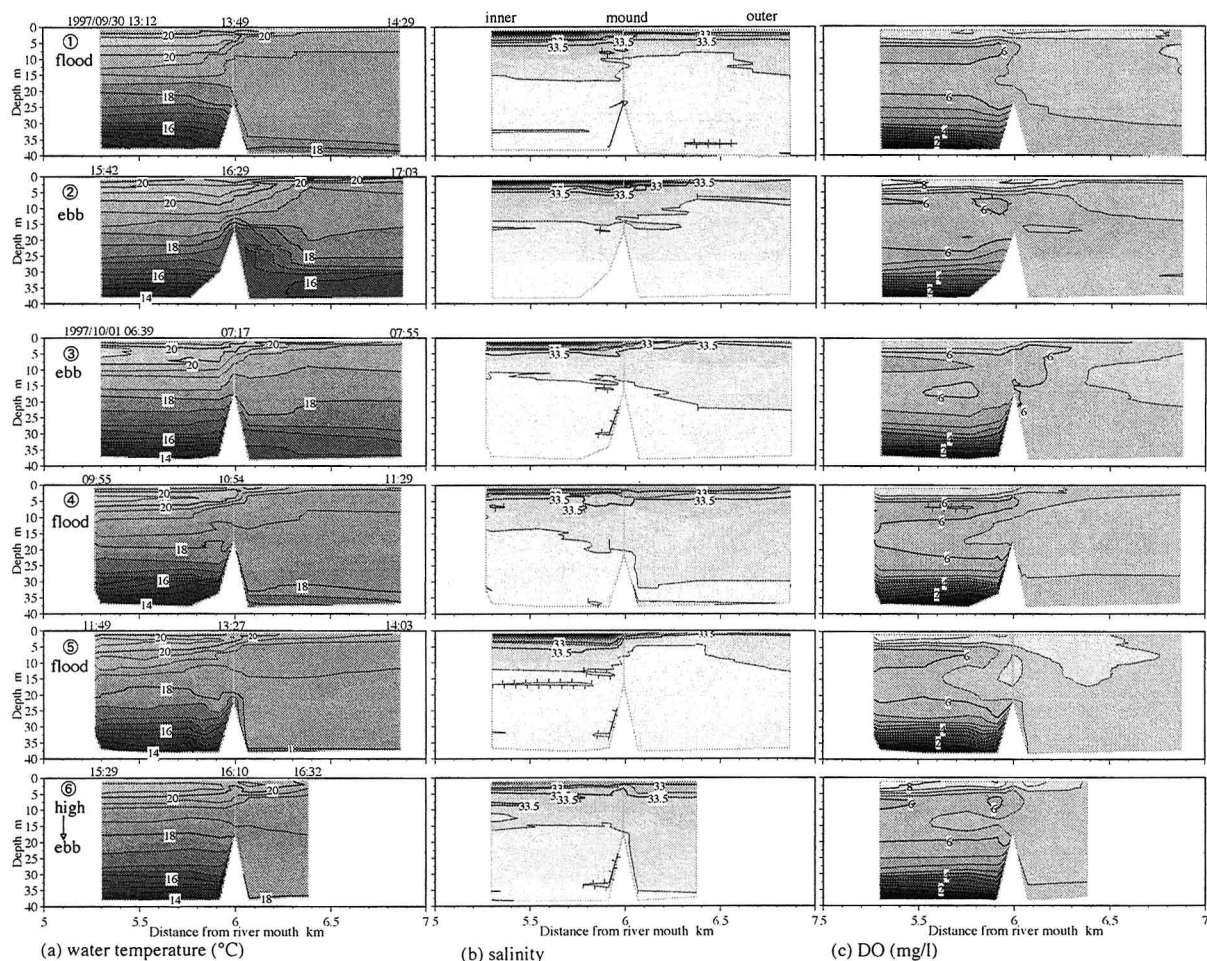


Figure 6 Time-series of water quality distributions around the mound (time in fig.(a) show the observation periods)

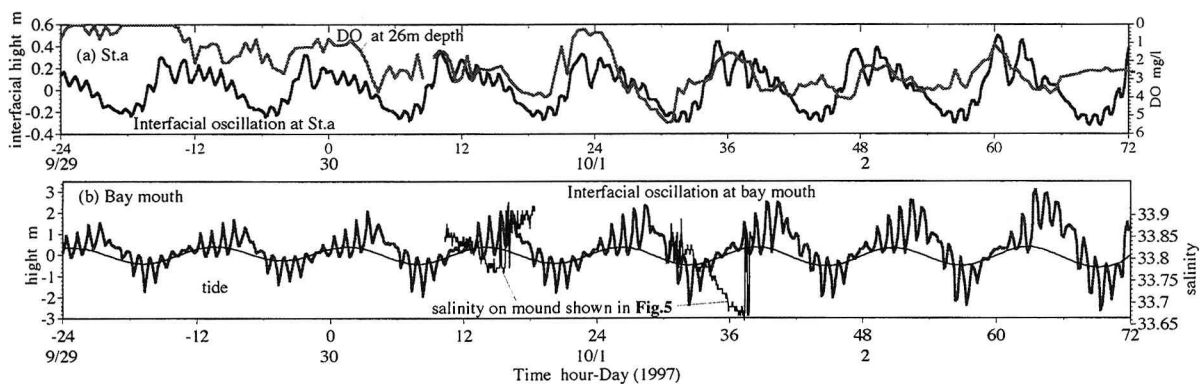


Figure 7 Interfacial oscillation of internal wave caused by tide (result of calculation using two-layer model)

から判断)が起きているのがわかる。Fig.5では、9月30日の下げ潮時にマウンド上での塩分の上昇と水温の低下が急激に起きている現象が現れており、この水塊が湾内の26mよりも深い水深にある水塊であることがわかる。10月1日になると湾内の水温18℃の水深が17m付近まで上昇し、上げ潮期の貫入水深が浅くなっている。

(3) 潮汐にともなう内部波

Fig.5に示した9月30日下げ潮期のマウンド上での塩分の上昇と水温の低下はSt.aでのDOの上昇とともに起っており、低層水が上下振動していることがわかる。この振動が低層水の湾外排出に関連していることが予想される。Fig.7にFig.5に示した期間を対象として計算されたSt.aと湾口部に

おける界面の振動状況を示した。内部波の再現計算には浅水波近似された2レイヤーモデルを用いている⁹⁾。密度界面を静水面から23mとし、上層と下層の平均密度は観測値を用いた。湾外は1層とし、密度は湾内上層の密度と同様の値を用いている。湾外での水位変動(観測値)を開境界(マウンドの沖約1km)から与えており、計算される内部波は湾口マウンドによって励起される振動を示している。(a)にはSt.aでの界面振動幅(計算値)とともに、水深26mでのDO(実測値)、(b)には計算された湾口部での界面振動幅、潮位とともにマウンド上で実測された塩分を示した。(a)に示したDOは界面の上昇時に低層水が湧昇することから増加方向を下向きにとっている。

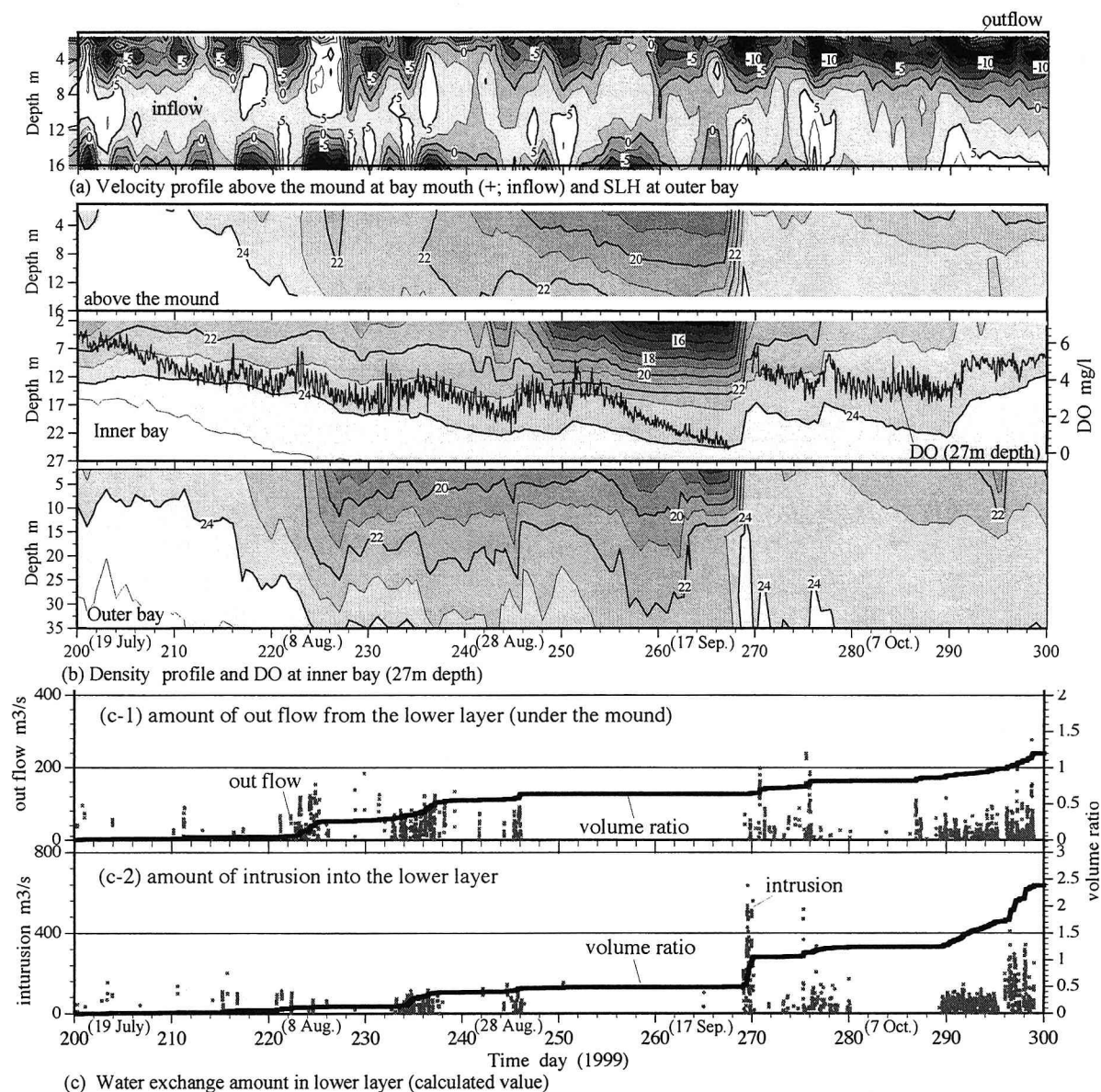


Figure 8 Observations (velocity and density profiles, and DO) and calculated water exchange amount (19 Jul. - 27 Oct. 1999)

Fig. 7(a)に示したDOの12時間程度の変動は界面の振動と良く対応していることから、内部波によるものであることが推測できる。湾口部での界面の振動は下げ潮期に最大となり、その振幅は上下層の密度差が小さくなるとともに増大し、数mの程度になっている。また、低層水の湧昇がマウンド付近のみで起こっている (Fig. 6) ことから、引潮に伴って低層水が連行されていると考えられる。9月30日16時頃からのマウンド上での塩分の上昇は界面の最上昇時と一致していることから、内部波によって低層水が湧昇し、引潮の流れに連行されて、排出が起こっていることが推論される。

4. 海水交換量の定量評価

海水交換量を定量評価するためには、湾口での流出入量を計測する必要がある。Fig. 8に1999年7月19日～10月27日に防波堤マウンド上で超音波ドップラー流速計 (スタンドアローン型, 0.5MHz: NORTEK 社製) により測定され

た(a)流速の鉛直プロファイルおよび同期間の(b)湾口部、湾内外での密度プロファイル、湾内DO(水深27m)、(c)湾内マウンド以深(15-30m)からの流出量と湾内マウンド以深への貫入量およびそれぞれの湾内マウンド以深の容積に対する割合の積算値(海水交換率)が示されている。流速は水深方向に50cm、時間間隔は5分、1分間の平均値を観測値としており、湾内への流入流速を正として示されている。

(1) 算定の方法

海水交換量は湾外水の湾内への貫入量と湾内水の湾内への排出量を実測された湾口での流速と湾内・口・外での密度プロファイル (Fig. 8(a), (b)) を用いることで、流出入に伴う低層湾内水 (マウンド以下にある水塊) の流動量から求められている。湾内外域を各層3mの10層に分け、水温・塩分の観測間隔である10分毎の貫入量、排出量を算出している。湾内水の排出量、湾外水の貫入量とも湾内外の上・中・下層で測定された水温・塩分 (観測点は Fig. 1 に示した St.a および St.c) とマウンド上 (St.b) に2~10m間隔で

測定された水温・塩分から縦断面観測結果を参考に内挿して作成された密度プロファイルと比較することによって求められた。湾内低層からの排出量は、マウンド上の各水深を通過した水塊密度から湾内のどの層の水塊が流出しているかを決定し、マウンド上での流向・流速から 10 分間の平均値として求められている。湾外水の流入量は排出量と同様の手法によっており、湾内への貫入層はマウンド上を流入する湾外水塊の密度と湾内の密度プロファイルとを比較することで決定されている(細部は参考文献 4) 参照)。さらに、算出された貫入・排出量の湾内マウンド頂部面以下(18 m 以深)の容積($26.7 \times 10^6 \text{ m}^3$)に対する割合から海水交換効率を算出している。

(2) 観測期間 (1997. 7. 9-10. 27) の特徴

220 日(8/8)頃から250 日(9/7)頃まで降雨の頻度が多く、この期間に湾外に低密度の水塊が形成され、湾内外に密度差が生じている。225 日(8/13)頃から湾外での密度が低下しており、盛川からの流出量が $5 \text{ m}^3/\text{s}$ を超える 250 日頃までは湾外での密度が湾内より低くなっている。

268 日(9/25)頃には湾外に高密度水塊 ($\sigma_t > 24$) が現れ、同時期に湾内低層での密度と DO が上昇し、上層の σ_t が 20 以下の水塊が消滅している。これらの変動とマウンド上での流速・密度プロファイルと比較すると、湾外の高密度水塊が湾内に流入(低層への貫入)し、湾内上層の低密度水塊が湾外に流出したことが推定できる。

(3) 計算結果の考察 (Fig. 8(c))

湾内マウンド以深(18m以深)への湾外水の貫入の頻度は高くないが、この期間では一度の貫入(数~10 日間)で底層水の容積比 20~50%程度の湾外水が湾底に浸入しており、効率の良い海水交換が行われている(Fig. 8(c-2))。特に、270 日(9/27)頃の貫入(湾外の 10m 以深への $\sigma_t > 24$ の水塊の浸入による)では、容積比 20%以上の湾外水が湾内中下層への浸入によって $\sigma_t = 24$ 面が 24m から 15m まで上昇しており、密度貫入によって中層以下の水質が劇的に変化(DO は $0.2 \rightarrow 4.4 \text{ mg/l}$) することがわかる。

湾内低層水の排出は貫入量に比較してその量が小さく、湾外水の貫入が起こるときにあわせて起こっている(Fig. 8(c-1))。270 日(9/27)頃からの湾外水の貫入が起こる以前までは、20%程度の湾内低層水を湾外に排出している。排出が起こっている時期は 215 日(8/3)頃までの湾外に高密度水塊が現れた期間であり、低層水の湾外排出においても、湾内外の密度差が重要な要因になっていることがわかる。この時には湾外にある高密度水塊(湾内下層水塊より密度は小さい)の上中層への流入により、湾内上下層の密度差が低下している。

また、湾内での成層が弱い時期の海水交換は、湾外水の密度貫入よりも、下げ潮時の内部波に伴う底層水塊の湾外排出に依る海水交換が卓越している。

5. おわりに

貧酸素水塊の成層期~消滅期に、湾内外水の成層状態が起こす湾口部付近での流れの発生機構と海水交換について現地観測結果に基づいて検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 湾内低層水塊の交換は潮汐に起因する内部波による低層水の湾外排出と湾内外の水塊の密度差を外力として起こる密度貫入が起こることによって行われている。
- (2) 密度貫入による低層水の海水交換は外湾に浸入してくる密度の状態によって決定されるために、数日の時間スケールでの現象ではあるが、1度の貫入量が多く、低層水の水質改善に与える影響は非常に大きい。
- (3) 湾内低層水の交換率が高くなるためには、湾内外の中層以浅に密度差が生じることが必要である。
- (4) 海流の変動や台風等によって湾内外の密度差が大き(湾外で密度が高い期間)になると、湾外水の下層貫入により、湾内底層水塊の交換が促進されている。1999.9.27頃には大船渡湾下層(16m以深)の20%以上の海水交換があり、これにより 4 mg/l 以上の DO の回復があった。

謝辞: 本解析に使用した大船渡湾での観測データは、1997~1999 年に港湾空港技術研究所(現、国土技術政策総合研究所)が第 2 港湾建設局(現 東北地方整備局)の協力により測得したものである。盛川の流量データは岩手県水産技術センターから提供を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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-, 港研報告 Vol.38, No.3, pp.3-36, 1999.
- 2) 日比野忠史: 北-西太平洋での水位振動と日本沿岸域での水位変化特性、海岸工学論文集第 48 巻(2)、pp.446-450, 2001.
- 3) 岡田知也, 中山恵介, 日比野忠史, 細川恭史, 古川恵太: 大船渡湾における底層 DO 濃度の変動に及ぼす湾外の影響、海岸工学論文集第 47 巻(2)、pp.1041-1045, 2000.
- 4) 日比野忠史, 駒井克昭, 鶴谷 広一, 岡田 知也: 湾口における高密度水塊の貫入機構のモデル化と海水交換量の推定、海岸工学論文集第 49 巻(2)、pp.976-980, 2002.
- 5) 豊田政史, 日比野忠史, 西森男雄: 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、水工学論文集第 43 巻, pp.1079-1084, 1999.

(2002. 9. 30受付)