

湾内外の密度差形成時の密度貫入による海水交換

Seawater exchange due to density intrusion under different stratification conditions

日比野忠史¹・池田正之²・駒井克昭³

Tadashi Hibino, Masayuki Ikeda and Katsuaki Komai

¹正会員 博士(工学) 広島大学工学研究科助教授 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 広島大学工学部(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 工修 広島大学工学研究科助手 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 can't be expected in the lower water. But, when the density of the outer bay becomes bigger than the inner bay after coming typhoon, the water body of the outer bay intrudes into the lower layer of the inner bay. Therefore, seawater exchange in the lower layer of the inner bay is accelerated.

Key Words: Ohfunato Bay, Sill, Sea level height, Flow rate, Density current

1. はじめに

大船渡湾(三陸沿岸, 39°N, 141.75°E)は昭和35年チリ津波により甚大な被害を受け, 昭和42年には津波防波堤が設置された。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。湾内で温度躍層の形成や有機泥によるバクテリア等の活性化が起こるために, 晩夏には底層に貧酸素水塊が形成される。大船渡湾は南北方向が約7km, 東西方向約2kmの南北に細長い湾であり, 最大水深約40m, 平均水深約20mの空間スケールを有している。湾軸に沿って, 水深30m以上の淵が湾央まで続いている。湾奥部には, 日平均流量2.6m³/sの流量規模の盛川が流れ込んでいる。湾口部には, 津波防波堤が建設されており, その開口部には, 水深約16mのところに長さ200m, 幅90mの捨石マウンドが存在している。また, 湾口から約1km地点で約90°に屈曲する地形となっている。なお, 大船渡湾の平面形状と本論文で用いたデータの観測点は論文末(Fig.6)に示されてあるので参照されたい。

これまでの観測から湾軸に直行する断面では水温・塩分は一様に分布しており, 軸方向においても湾口部付近をのぞいて潮汐の影響は小さいこと, 湾軸方向の潮汐に伴う流れは屈曲部付近までは流速が小さく, 屈曲部を越えてから

流速が大きくなり始め, マウンド上で最大となっていることがわかっている¹⁾。

本論文では, 湾口マウンド上で測定された流速プロファイルおよび湾内中央, 湾口, 湾外で測られた水温・塩分プロファイルを用いて湾内への流出入量と水位, 密度等の関係から海水交換に及ぼす湾内外の密度変化の影響について検討を行った。

2. 湾内外の成層状態と水位の季節変動

(1) 湾内外での水温・塩分プロファイルの経時変化

Fig.1には湾内中央と湾外(マウンドから約400m沖)で1999年3月18日～9月24日に係留測定された水温と塩分のプロファイルおよび湾内水深30mでのDOと水温の経時変化が示されている。水温・塩分センサーの係留水深は湾内の2m, 10m, 16m, 27mと30mおよび湾外の2m, 16m, 25mと35mである。水温・塩分プロファイルは日平均値が示されている¹⁾。

Fig.1から, ①-1;湾内に比較して湾外において1週間程度の水温・塩分変動が顕著に現れているものの, 湾内外の水温・塩分の季節的な変化の傾向は良く対応していること, ①-2;湾外水温の上昇は湾内水温上昇より早期に起こっていること, ②-1;4月頃から湾外で塩分が低下し始め, 湾内

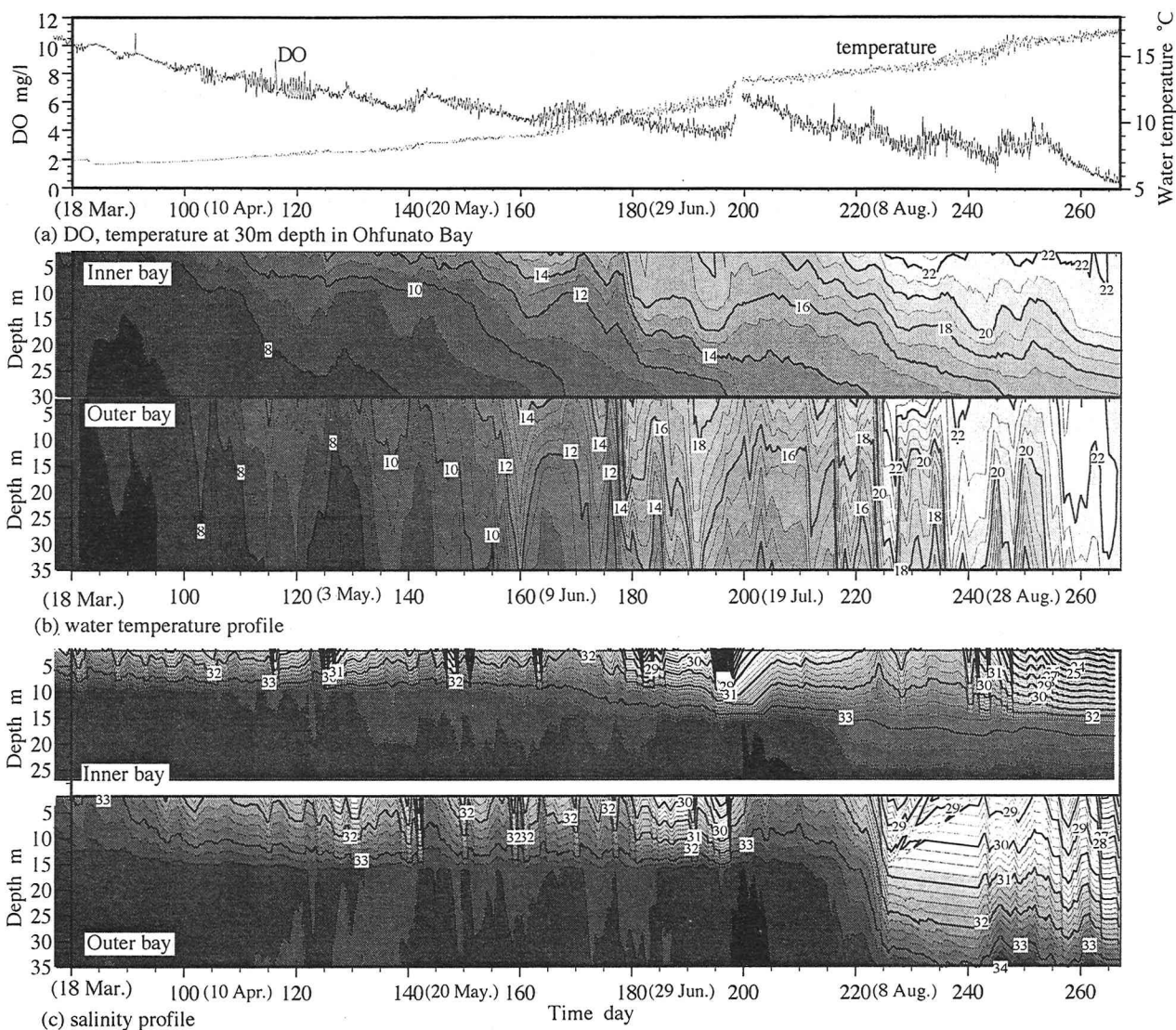


Fig.1 Time series of DO and water temperature (35m depth inner bay), water temperature and salinity profile at inner bay and outer bay (18 Mar. - 24 Sep. 1999)

では上層の水温が上昇し、躍層の形成が始まっていること、②-2; 6月頃からの湾外での塩分の上昇に伴って躍層が急激に発達していること、②-3; 躍層の形成に伴って湾内中層の塩分の低下が観測されていること、③7月中旬頃湾外での塩分低下(台風4号が起因)とその後の塩分上昇によりDOの急激な回復が起こっていることがわかる。

これらの現象の発生は、湾内成層が湾外水の流入と関連が強いためであり、大船渡湾に接岸する水塊が異なる海流系の水塊であること、湾周辺にもたらされる台風や低気圧によって湾内外の水塊に密度差が生じることに依るものである。上記の①-③の現象は著者のこれまでの研究から、湾外水塊の湾内貫入による海水交換機構²⁾(①, ②)、成層期におけるDOの回復機構¹⁾(③)によって説明がつけられる。

(2) 湾口マウンド上での流速プロファイル

Fig.2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, 以下 ADP)により測定された(a)流速の鉛直プロファイルおよび同時期の(b)湾内外での水温プロファイル, (c)河川(盛川)流出量, 湾口での日平均流出量の日変化が示されている。流速の観測間隔は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いる。流速プロファイルのパターンは湾内外の水温プロファイルによって変化していることがわかる。湾外水温の低い時には下層からの流入パターン, 湾外水温が高くなると上層からの流入パターンになっている。湾内の躍層消滅後は, 常に下層からの流入が起こっている(エスチャリー循環が卓越)。岡田ら²⁾は, 湾外水の湾内への密度貫入によって湾内の密度(水温・塩分)プロファイルを再現している。この考えにもとづけば, 水温の低い湾外水塊は湾内下層へ貫入し, 湾外水塊の水温が高くなると上層へ流入(湾内上層水塊の湾外下層への流出)することによって上記の湾

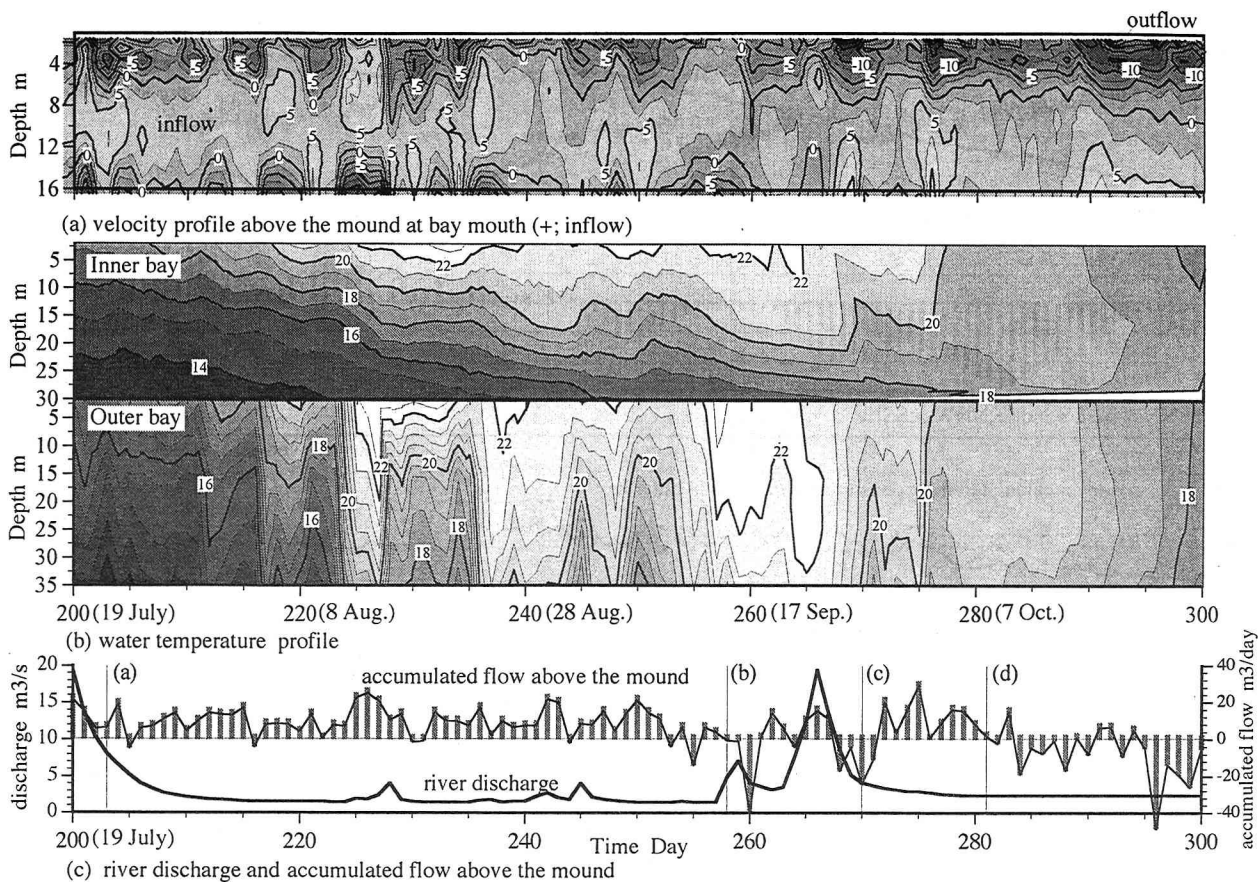


Fig.2 Daily changes of velocity profile above the mound at bay mouth, water temperature profile at inner bay and outer bay and discharge (19 July - 27 Oct. 1999) ((a)-(d) in fig.(c) show the periods described velocity profiles in Fig.4)

口マウンド上での流れが起こっていると考えられる。

先ず河川流出量の湾内水流出への影響について検討する。20m³/sの河川流出が24時間継続すると仮定すれば、大船渡湾の水位を約40cm上昇させる。湾口(幅200m)での流出入量と比較すると洪水時には100倍以上の河川流出がある。洪水時には10m³/sを越える河川水が湾内に流出して、湾口部では流入傾向にある。これは、河川水が湾表層をプルームとして湾外に流出していく(ADPでは表層流速を正確にとらえていないためにこの現象は捕捉できていない)ため、これに伴ったエスチャリー循環により湾外水が流入していると考えられる。このような現象が起こることが推測できる(Fig.2(c))。ちなみに、湾口部上層からの10cm/sを超える流出傾向は湾内中層水温が上昇する9月以降の洪水後に現れている。また、280日以後(躍層消滅後)の流出傾向は風との対応(吹送流)がある。

(3) 湾内外の水温分布と湾口部での流況

Fig.3には(a)流速プロファイルから求められた湾内流入量の累積値(水位換算値)と湾内DO、(b)北北西-南南東方向の風(卓越風)、(c)湾外水位(気圧変動分を除去、水位変動量は気圧効果が静的に働く(-1cm/hPa)として、1013-SLPによって算出³⁾)と湾外下層密度から求められた換算水位、(d)湾内外の平均密度が示されている。平均密

度は塩分観測データの信頼性の高い湾内外の3水深(2m, 16m, 30m; 湾内, 35m; 湾外)の水温・塩分データから求められた。なお、水深2mデータは上層6mまで、16mデータは6-20mまで、30mと35mは20m以深の代表値としている。密度からの水位換算は1997-99年に観測された湾外水深35mでの水温・塩分の時系列データと気象庁によって行われた1990-98年の海洋観測資料(CTDデータ)をもとに求められた次式によって行われている³⁾。

$$V_2 = (\rho_1 - \rho_2) V_1 / \rho_2$$

ここに、 V は水塊の体積、 ρ は密度、添え字1, 2は各々黒潮系水塊および侵入前の水塊を表す(観測結果から $\rho_1 = 1025.54 \text{ kg/m}^3$)。また、流速プロファイルからの水位は累積流量を大船渡湾の表層3m未満以浅の平均面積 $4.58 \times 10^6 \text{ m}^2$ で除して換算されている。

Fig.3から①本観測期間での湾口を通過する累積流量(残差流量)による水位変化量は数cmであり、水位変動量の1/10程度であること、②北北西の風(季節風)が吹き始めるとともに湾内の成層が消滅し、DOの急激な増加が観測されていること、③-1; 湾外水位は湾外密度の換算水位と対応して変動しており、換算水位は湾外水位の下限値を連ねていること、③-2; 湾外水位と湾外密度の換算水位に差が

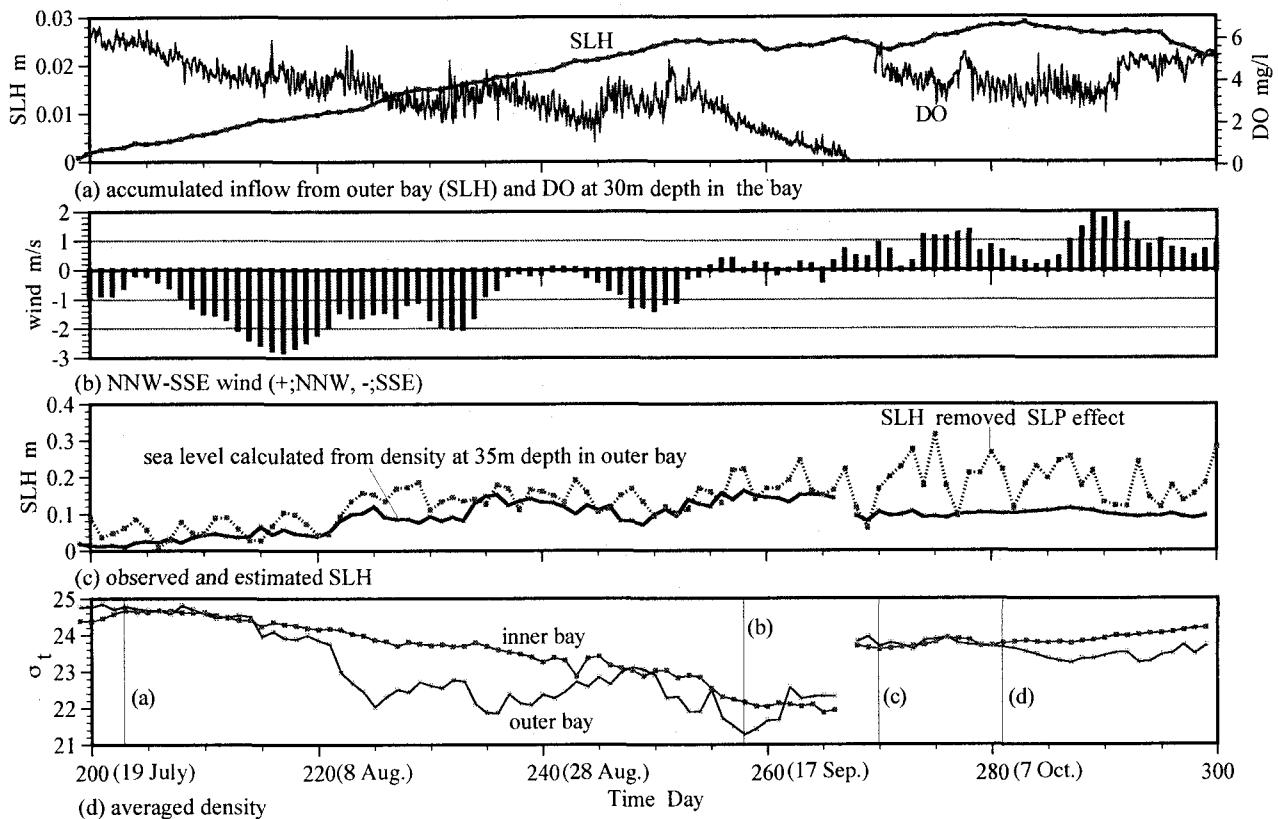


Fig.3 Time series of meteorological element and water qualities at inner bay and outer bay (19 July - 27 Oct. 1999)

((a)-(d) in fig.(d) show the periods described velocity profiles in Fig.4)

生じるのは北北西の風が吹き始めた後であること、④-1;湾内外の密度差の大きい(湾外で密度小さい)時期に高水温水塊がマウンド上層から流入していること、④-2;湾内外の密度差小さい時期には湾外水塊はマウンド上の下層から流入していることがわかる。

①の現象は外海水の移流による水位変動が小さく、海水交換による密度変化によって季節的な水位変化が起こっている(Fig.2(c))ことを示している。①と④から、湾内水塊の交換は潮汐によって起こる湾内外の水塊交換が主要因であり、交換時に密度貫入が起こることによって湾内外の水塊が相互の異なる水深に浸入することで効率の良い交換が行われていることが推測できる。ここで、底層 DO の上昇は DO を多く含む密度の大きな外海水が湾内下層に浸入していることを示している。

②および③に示すように、季節風(大船渡湾では NNW-SSE 方向の風が卓越し、秋～冬に NNW の風が吹く)とともに水位上昇量が大きくなる。さらに、低水温(高密度)の外海水塊が湾に流入することによって、湾内の成層を壊している。以上のように内湾の水質の変化と季節の関係は深く、気象・海象を考慮した内湾の水質を検討する必要がある。

3. 潮位変動に伴う湾口での流れ場

Fig.4 には 1999 年の (a-1)7 月 22 日 9:00, (a-2)11:00,

(a-3)13:00, (b-1)9 月 15 日 16:00, (b-2)18:00, (b-3)20:00, (c-1)9 月 27 日 2:00, (c-2)4:00, (c-3)6:00 および (d-1)10 月 8 日 13:00, (d-2)15:00, (d-3)17:00 に観測された湾内(St.a)～マウンド～湾外(St.c)の密度((b)は水温)分布およびマウンド上の流速プロファイルが示されている。いずれの時期も上げ潮～満潮～下げ潮に対応するプロファイルが示されている。図中の値は 30 分間の平均値(密度は 3 回、流速は 6 回の測定結果)が示されている。これらの期間(Fig.2(c)と Fig.3(d)中の縦線)は湾外での平均密度が大きい時期(a)、湾外で密度の小さい時期(b)、洪水直後(c)および密度成層消滅期(d)の潮汐に伴ったマウンド上での流速プロファイルと密度(水温)分布について示している。

(1) 湾内外の密度差と湾内への流出入機構

マウンド上での流れは各時期で異なっており、湾内外の密度差が流れを支配していることがわかる。湾外で密度が大きい期間(a)では上下層逆の流れ(上層で流出、下層で流入)が生じている。湾口下層から流入した水塊は湾内下層の等密度層に貫入し、湾内中下層の水温を上昇させている(Fig.2(b))。さらに、下げ潮時においても湾口中層から湾内への流入がある。(c)の期間は湾内上中層の低密度化が起こった後であり、湾外に外海水が接岸することにより湾内外の密度差は大きくなる。湾内外の密度差が大きくなると、湾口下層の流れは潮の干満によらず流入し、湾外水の密度貫入は常時起こっている⁴⁾。湾外で密度が高い期間は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

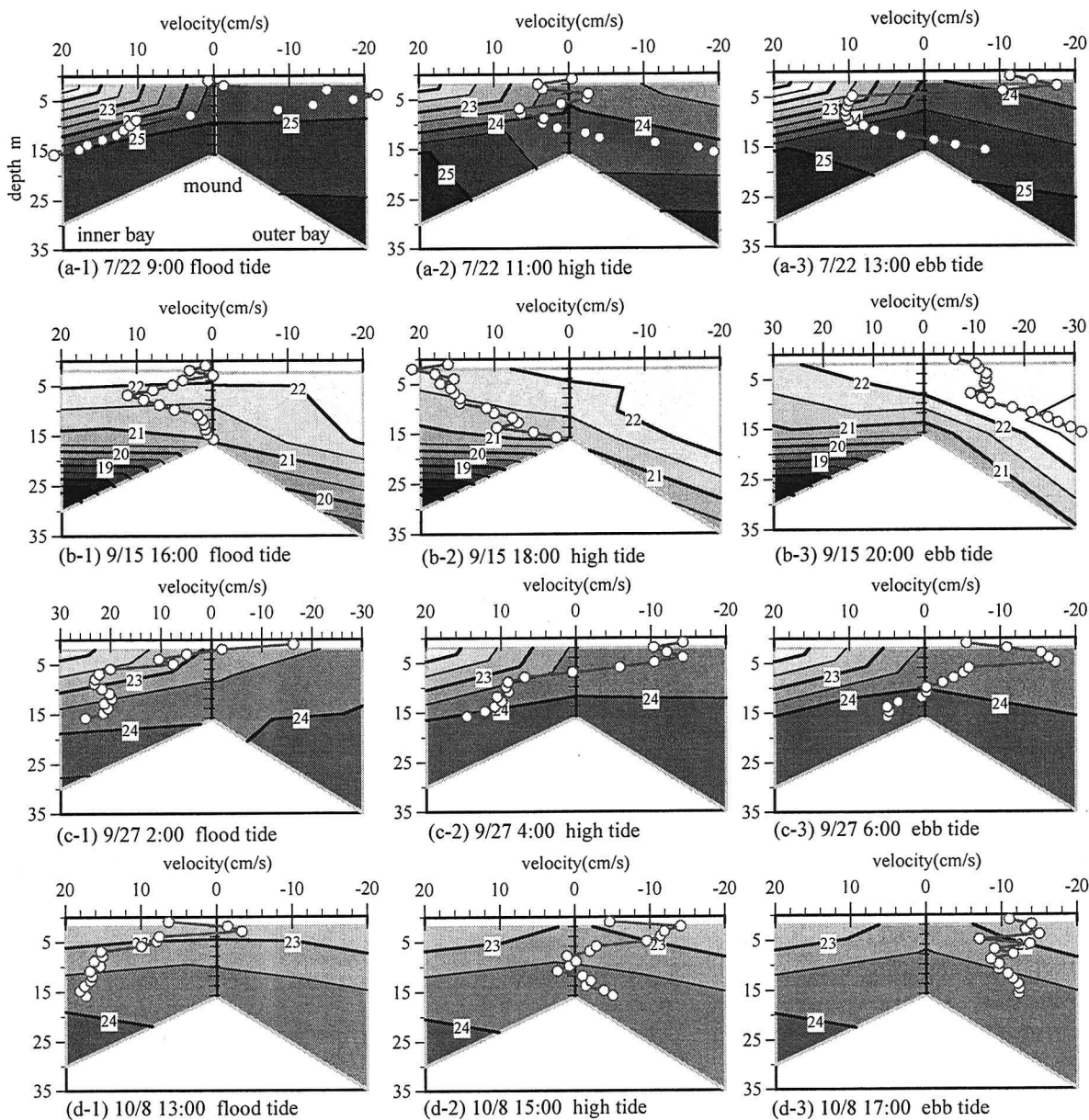


Fig.4 Velocity profile above the mound at bay mouth, density ((b) water temperature) profile at inner bay - bay mouth - outer bay from flood tide to ebb tide

ていることがわかる。

湾内よりも湾外の密度が小さい(水温が高い)時期(b)および(d)には、湾内外の密度の分布状況によって湾口での流れのパターンが異なっている。湾内外の密度差が大きい時期(b)には、上げ潮時に湾口上層からの流入、下げ潮時には下層からの流出が卓越している。(b)の期間には、湾内DOの消費が観測されており下層にDOを供給するための海水流動は起こっていない。この期間の密度状態では湾内上層水塊の交換が顕著になり、下層水塊の交換は期待できない。

また、(d)の期間に上層で常に流出が起こっているのは、表層密度が湾内で小さいことに起因する。さらに、マウンド上で密度が高くなるのは、下げ潮(湾口下層で流出)時に起こる内部波によって湾内の底層水塊が湾外に排出された

ためである⁵⁾。この時期(湾内での成層が弱い)の海水交換は湾外水の密度貫入に依らず、中層での混合や、これによって促進される下げ潮時の内部波に伴う下層水塊の湾外排出に依る海水交換が卓越しているものと考えられる。

(2) 潮汐に伴った海水交換量の推定

Fig.5(a)～(d)には、Fig.4 に示した期間に対応する潮汐の前後1潮汐分の水位変化と湾口マウンド直上の下層(8～16m)および上層(0～8m)の流出入量との関係が示されている。湾外での密度が大きい期間(a),(c)では、湾口部下層からの流入、上層からの流出が支配的であるのに対し、湾外の密度が小さい期間(b)と密度成層消滅期(d)では、上層・下層の流出入量は、ほぼ同位相・同振幅で変動している。

海水交換は(a)と(c)の期間に促進されていることがわかる。期間(a),(c)では、重い湾外水が貫入によって湾内の底層

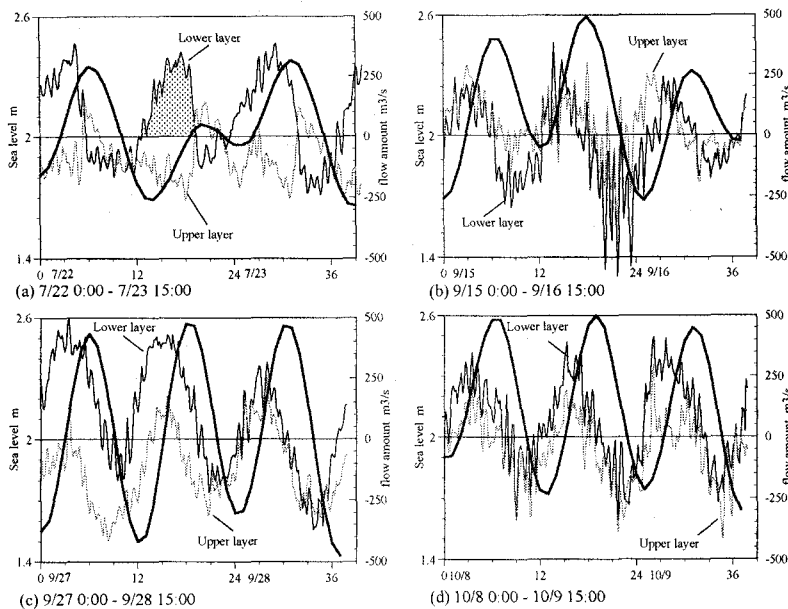


Fig.5 Relationship between SLH and amount of inflow and outflow

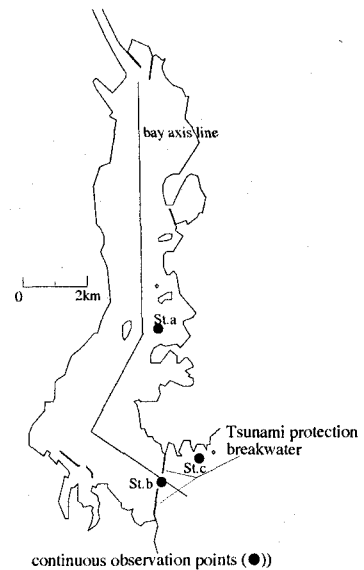


Fig.6 Plan of Ohfunato Bay and observation points

に流入している²⁾。この場合には、湾内上層水が流出し、流入量を海水交換量として数えることができる。例えば、Fig.5(a)の半日潮(ハッチで示した期間)では約 $3.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (大船渡湾内の全水量の 1/30) の海水交換があったことになる。

4. おわりに

貧酸素水塊の形成～消滅期(7月中旬～10月)に、湾内外水の成層状態が起す湾口部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) 湾口での流出入量(残差流量)と比較すると洪水時には100倍以上の河川流出がある。洪水時には $10 \text{ m}^3/\text{s}$ を越える河川水が湾内へ流出しているが、湾口部では湾内上層水の流出に伴って湾外水が流入する傾向にある。洪水時にこの機構により海水交換が促進されている。
- (2) 湾内水塊の交換は潮汐によって起こる湾内外の水塊交換が主な要因であり、交換時の密度貫入に伴って湾外の水塊が湾内の同密度の水深に浸入していることが効率の良い交換を進めているものと推測できる。
- (3) 湾口での流出入(収支)による水位変化は、水位変動量の1/10程度であり、外海水の移流による水位変動量は小さく、海水交換による密度変化に伴って、季節的な水位変化が起こっている。
- (4) 湾内外の密度差が大きくなると、湾口下層の流れは潮の干満によらず流入し、湾外水の密度貫入は常時起こっている。湾外で密度が高い期間は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。台風4号来襲後(7/22)の半日潮では大船渡湾内の全水量の1/30の海水

交換があった。

- (5) 湾内での成層が弱い時期の海水交換は、湾外水の密度貫入に依らず、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くる。

謝辞: 本解析に使用した大船渡湾での観測データは、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) 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.
- 3) 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.
- 4) 日比野忠史, 岡田知也, 中山恵介: 湾内外の密度差による湾口部での流出入機構, 水工学論文集第44巻, pp.945-950, 2000.
- 5) 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, 第43巻, pp.1079-1084, 1999.

(2001. 10. 1 受付)