

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

日比野忠史*・駒井克昭**・鶴谷広一***・岡田知也****

大船渡湾において 1996～98 年の観測から得られた海水交換に関する知見によって 1999 年に行われた流速・密度の連続観測結果を説明できるかを検討し、海水交換機構を明確化し、海水交換量を定量的に評価できるモデルを構築した。本モデルを用いた湾内水温の再現計算から、湾内流動を起こす外力を評価するとともに、密度貫入による湾内底層水塊の交換量を定量評価した。この結果、湾外水の密度が変化することが湾内底層水塊の交換を促進していること、一度の貫入によって湾内底層容積の 10～20% を交換していることを明らかにした。

1. はじめに

大船渡湾（三陸沿岸，39°N，141.75°E）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 16 m のところに長さ 200 m、幅 90 m の捨石マウンドが存在している。図-1 には大船渡湾の平面地形および湾軸に沿う断面水深図と観測地点が示されている。本論文では St. a を湾内、St. b を湾口、St. c を湾外の代表点として用いている。また、各観測点での密度プロファイルは上中下層で測定された水温・塩分データから求められている。これまでの観測から湾軸に直行する断面では密度は一樣に分布しており、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く（日比野ら，1999）。また、著者らは、湾内外の密度差による海水交換機構を明らかにする（日比野ら，2000）とともに、湾外高密度水塊の湾内低層への密度貫入を表現した一次元モデルによって経年の湾内密度（水温・塩分）プロファイルと底層 DO の変動を再現している（岡田ら，2000）。さらに、1996～99 年に行われた断面観測（図-1 に前線通過後 1999. 7. 17 に湾内の密度を安定しつつ、高塩分水塊が湾内に流入する現象を示した）および水温・塩分、DO の連続観測でも湾外水塊の密度貫入が捉えられており、密度貫入が大船渡湾の海水交換に重要な役割を果たしていることがわかっていく。本論文では、湾内外および湾口部における流速・水温・塩分プロファイルの連続観測結果から、湾口部における流出入量を定量評価し、これを再現できる準二次元モデルを構築した。このモデルによって湾内密度プロファイルの密度貫入を含めた湾内水塊の海水交換機構について検討している。

2. 湾内外の成層状態と海水交換

2.1 湾口マウンド上での流れパターンと湾内外密度差

図-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，0.5 MHz：NORTEK 社製）により測定された (a) 流速の鉛直プロファイルと湾外水位（SLH）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 27 m）、(c) 湾口での日平均流出入量（正が流入）、大船渡湾での卓越風である NNW 風速、雨量、河川（盛川）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。

流速プロファイルには湾内外の密度差や気象変化によって異なったパターンで生じる流出入が現れている。図-2 から①-1；220 日頃と 250 日頃から 20 cm 程度の水位上昇が起こっており、この時には両期間とも湾外に低密度水塊が現れ始めていること、①-2；水位の顕著な下降は降雨時から降雨後（高気圧の発達時）に起こって

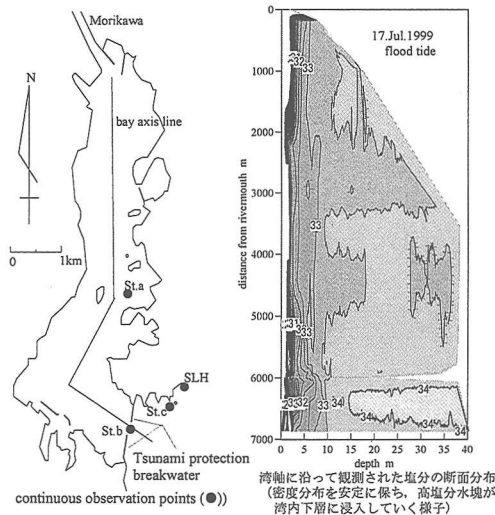


図-1 大船渡湾の地形と観測点位置

* 正 会 員 工 博 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
** 正 会 員 工 修 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻
*** フェロー 工 博 東海大学海洋研究所
**** 正 会 員 工 博 国土交通省国総研沿岸海洋研究部海洋環境研究室

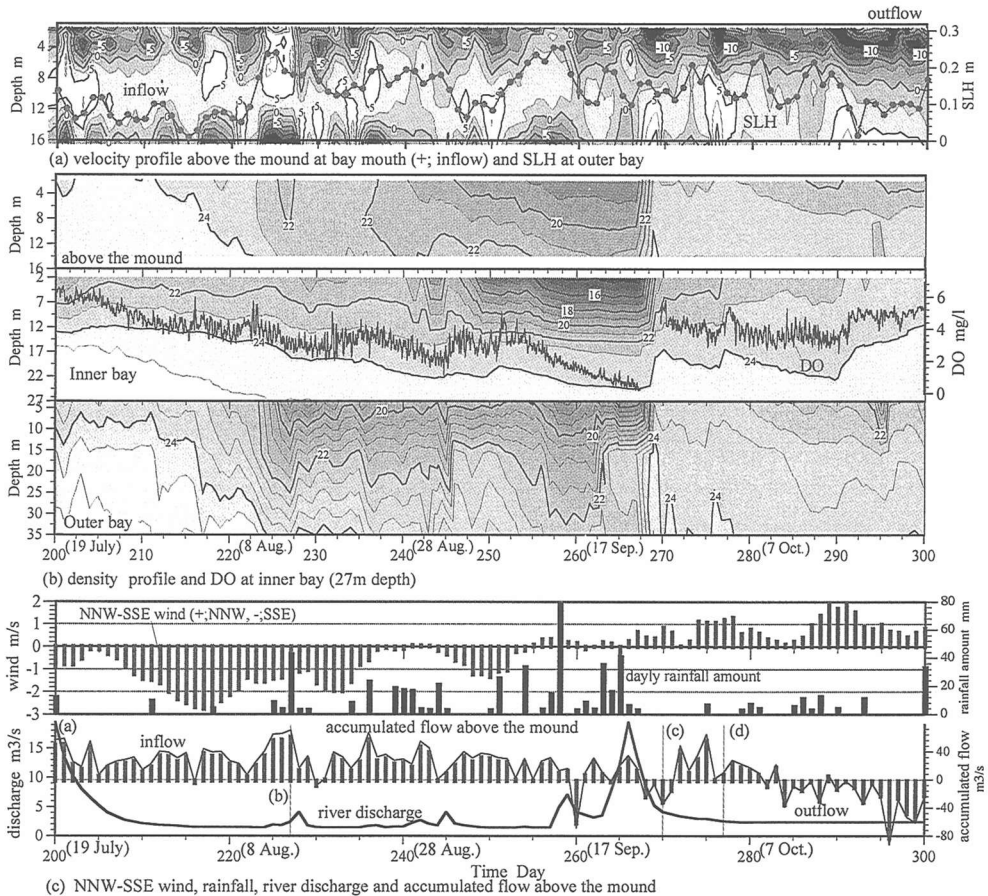


図-2 湾口部マウンド上での流れに及ぼす湾内外の密度状態と気象・水位条件 (19 July-27 Oct. 1999)

(図 (c) 中の (a)~(d) の期間は図-3 で示す (a)~(d) の期間に対応している)

いること, ①-3; 湾外水の流入水深は水位の上昇時には湾口下層から上層に移動する (下降時は逆に上層から下層に移動) 傾向にあること, ①-4; 水位と DO の相関がないこと, ②-1; 270 日頃に高密度水塊 (24 kg/m^3 以上の水塊, σ_t が 22 kg/m^3 以下の水塊は消滅) が湾外に現れた後, 湾内密度は上昇し, 同時に DO が上昇していること, ②-2; 湾内底層 DO の上昇が観測されているときにはマウンド直上で 5 cm/s を超える流入速度が生じていること, ②-3; 観測期間中, 湾口上層からの流出傾向にあること, ②-4; 湾内の躍層消滅後 (NNW の風が卓越) は, 湾口部上層からの 10 cm/s を超える流出があり, 常に下層からの流入が起こっていること, ③-1; 降雨の頻度が多くなった 225 日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こと, ③-2; 盛川からの洪水流出量は湾口からの流出入量の 1/10 程度 (平均) であり, 洪水時においても水位の上昇は観測されていないことがわかる。

①~③の観測結果から, ④~⑧の現象が推測できる。

④湾口 (マウンド上) での流れパターンは水位の日変動 (気象潮) との関連が強い (水位上昇時は湾口下層からの流入, 下降時は湾口上層からの流出が卓越) こと, ⑤河川からの流出水塊が湾内で混合することは少なく, 河川水の湾外へ流出速度は速い (河川水が湾表層をブリュームとして湾外に流出していく) こと, ⑥湾外に高密度水塊が浸入してくると, その水塊は湾内下層へ貫入し, 湾内下層へ DO を供給していること, ⑦湾外への淡水供給は河川からのみではなく, 湾周辺からの降雨流出等によって行われており, これらの水塊は湾内上~中層へ浸入していること, ⑧躍層消滅後に湾口上層ではエスチャリー循環が卓越する (気圧の低下に伴う水位下降し, 季節風向も変化する季節に対応している) こと。

2.2 潮位変動に伴う湾口での流れパターン

図-3(a)~(d) には, 観測期間で湾内外の密度状態の異なる 4 期 (図-2(c) 中の縦線) における潮汐変化, 湾口マウンド上の下層 (8~16 m), 上層 (0~8 m) の流出

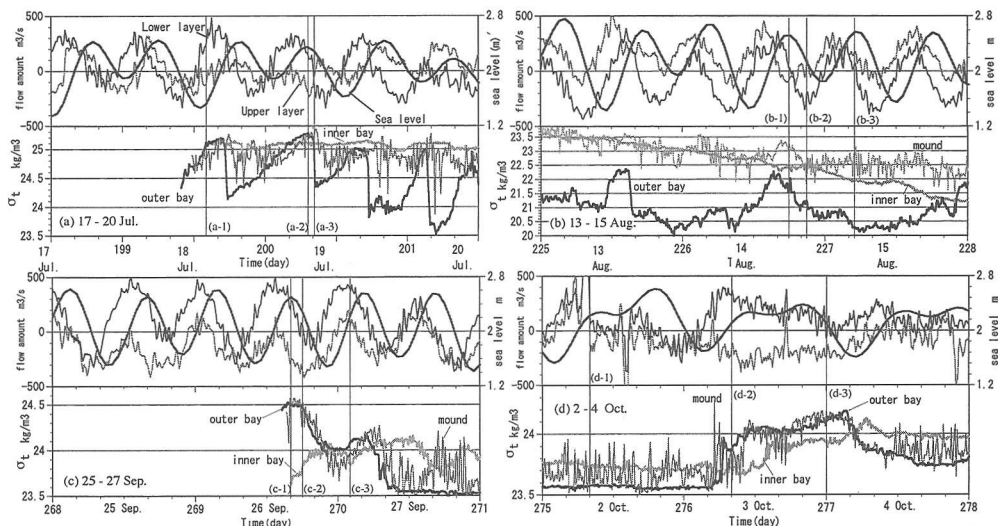


図-3 湾口上下層での流出量、潮位および湾内～湾口～湾外中層（マウンド直上レベル）における密度の経時変化（上層流出量は0～8m，下層は8～16mの間の積分値，(a-1)～(d-3)は図-4の時間に対応）

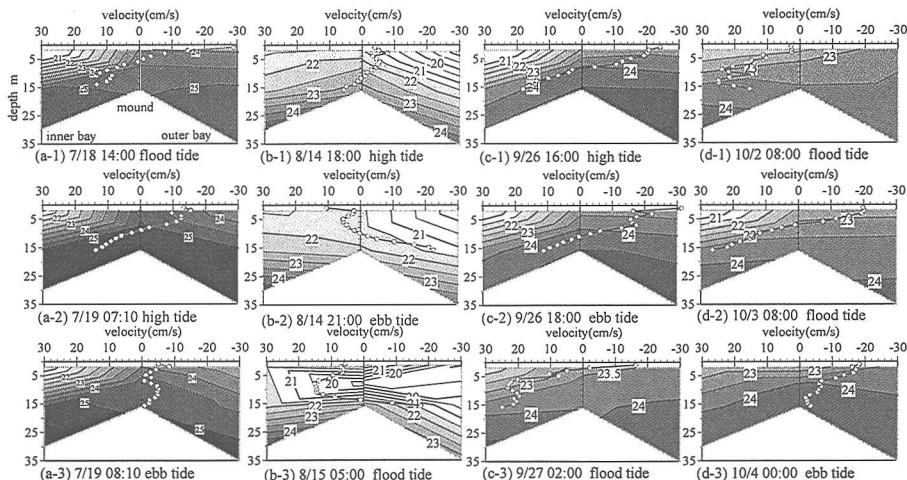


図-4 マウンド上の流速分布と湾内～湾口～湾奥での密度分布 ((a)～(d)の期間は図-3中の期間に対応する)

入量および湾内～湾口～外の16m層における密度との関係、図-4には図-3に示した各々の期間((a-1) 7月18日14:00上潮、(a-2) 19日07:10満潮、(a-3) 08:10下潮、(b-1) 8月14日18:00満潮、(b-2) 21:00下潮、(b-3) 15日05:00上潮、(c-1) 9月26日16:00満潮、(c-2) 18:00下げ潮、(c-3) 27日02:00上潮および(d-1) 10月2日08:00上潮、(d-2) 3日08:00上潮、(d-3) 4日00:00下潮)に観測された湾内(St.a)～マウンド上(St.b)～湾外(St.c)の密度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。図中の値は対象時間を中心に30分間の平均値(密度は3回、流速は6回の測定結果)を示している。

全期を通して湾外での密度が大きくなると、湾口下層

からの流入が卓越してくることがわかる。洪水後の期間(a)，(c)では、どちらも流出ピーク後に湾外に高密度水塊が浸入してきているが、湾内外の密度状態が異なるために、湾口での流れのパターンが異なっている。期間(a)では潮汐に伴う流れが支配的であるのに対し、期間(c)では密度流が卓越(湾外で密度大)している。図-4では両期の流れのパターンは類似しているが、下げ潮期の(a-3)と(c-2)を比較すると期間(c)では下げ潮期にも湾内水塊よりも密度の高い水塊が外湾に存在しており、下げ潮流も密度流の影響が強いことがわかる。

密度成層消滅後の期間(d)では、湾外に高密度水塊が浸入してくると外湾水塊は湾内中層以深に浸入し、湾内の密度を効率的に上昇させている。流れパターンは期間

(a)の流れに近く、湾内16m層で密度が高いときには中層貫入になっている(図-4(d-1))。

湾外での密度が小さい期間(b)には、潮汐が支配的で上下層で同位相の流れパターンになっており、湾外水は湾内の上層(同層)に流入している。湾外に浸入してくる水塊の密度が上昇してくると、湾口下層からの流入に転じている(図-3(b), 図-4(b-1))。このときには湾外での密度の上昇に伴って、マウンド上での密度が最も高くなっていることから、湾外中層以深の水塊が湾内に浸入していることがわかる。さらに、227日以降には湾内外の密度差が小さくなり(湾外水の中層浸入による湾内密度の低下)、湾口16mに湾内16m以深にある高密度水塊の出現していることから、湾内低層水の湾外流出が観測されている(内部波による海水交換、豊田ら、1999)ことがわかる。これらのことから、湾外の水塊密度が湾内よりも低い状態が持続する場合にも湾内中層以深の水塊密度を低下させ、密度貫入や内部波による海水交換の促進につながっていることがわかる。

3. 密度貫入モデルによる湾内密度プロファイルの再現

3.1 モデルの概要

本計算モデルは岡田ら(2000)の一次元モデルを基本に湾口で実測された流速分布(図-2(a))を用いることで、流出に伴う湾内水量の連続性を満たすように構築された準二次元モデルである。湾外水の湾内への貫入は湾口流速と湾外水温・塩分から得られる湾外水塊の流入フラックスを湾内の同密度層に浸入させることで表現している。湾外水が湾内水よりも密度が低い場合(図-4(b))には、移流によって湾内に浸入するとし、実測流量フラックスを湾内の同層に混合させている。

(1) 基礎方程式

(水温: T (°C))

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{A} \frac{h}{\rho C_p} - \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$h = -\frac{\partial Aq(z)}{\partial z}$$

$$q(z) = (1 - \beta) \cdot Q_s \exp(-\kappa z)$$

(塩分: S)

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

(z 方向の流速 $w(J)$)

$$w(J) = \frac{a}{A(J)} \times u(J) + \frac{A(J+1)}{A(J)} \times w(J+1)$$

ここに、 J : 鉛直方向座標(水表面を原点にして下向きに正)、 A : 各層の表面積(m^2)、 a : 湾口断面積($600 m^2$)、 β : 水面に到達する有効短波放射 Q_s のうち水表面の薄

い層に吸収される割合($=0.4$)、 κ : 消散係数($=0.276$)、 Q_T : 全熱収支量($J/m^2/day$)、 C_p : 比熱($J/g/K$)、 K_z : 鉛直拡散係数(m^2/s)、 u : 湾口流速(m/s)である。

(2) 計算条件等

(計算メッシュ等) $J=1 \sim 10$ 層(各層3m)、 $\delta t=10$ min、 x 軸方向の代表長さは各層の湾軸長としている。

(初期条件) 1999年7月18日の断面観測結果

(熱交換の境界条件)

$$\text{表層: } -K_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_T}{\rho C_p}$$

$$\text{底層: } K_z \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

(流れの境界条件)

湾口流速・湾外密度: 実測値(図-2)、底層: $w=0$

3.2 計算結果の考察

再現計算では移流効果を再現した case 1、移流・貫入効果を再現した case 2、太陽放射のみの影響を考慮した case 3 の比較を行い密度貫入の効果を検討した。図-5に実測値と3つのケースでの水温の計算結果(2m, 16m, 27m)を示した。図-5から⑨湾口での実測流速を用いることで、16m以浅での水温の経時変化を再現できている(case 2 がより実測に近い)こと、⑩密度貫入の効果を入れることによって湾内下層での水温の経時変化を再現できている(case 2)こと、湾外からの流入を考慮しなければ、湾内密度を再現できないこと(case 3)がわかる。以下での⑤~⑦は2.2で示した現象に対応している。

(1) 湾内中上層での再現(⑨)

湾外の密度のみを用いて湾内中上層の水温分布を良好に再現できていることから、湾内への流出した河川水の湾内中層への影響は小さい(湾内に流出した河川水が湾内で混合して密度を低下させている場合には湾外の情報だけでは湾内を再現できない; ⑤)こと、湾外の水塊密度が湾内密度よりも低い場合には、潮流によって(湾内外の密度差に関わらず)湾内の同レベルの層に流入する(⑦)ことを明らかにできた。さらに、上中層への移流量は潮汐との対応が良いが(大潮時に $500 m^3/day$ 程度の流入)、湾内外に密度差が生じると潮流よりも密度流が卓越する。この時には、湾外が低密度であっても湾外からの低密度水塊が湾内に浸入によって中層以浅の密度が低下し(図-3(b))、湾外水の中層貫入が生じている。

(2) 湾内下層での海水交換量の推定(⑩)

図-6にはcase 2で再現された湾内の10層(27-30m)、6~10層(15-30m)への密度貫入量と1~6層(0-18m)への移流量および各層の容積(10層以深: $6.0 \times 10^6 m^3$, 6層以深: $26.7 \times 10^6 m^3$, 6層以浅: $68.4 \times 10^6 m^3$)に対する貫入量、移流量の割合が示されている。図中の縦線は図-4に示した(a)~(d)の時間に対応して

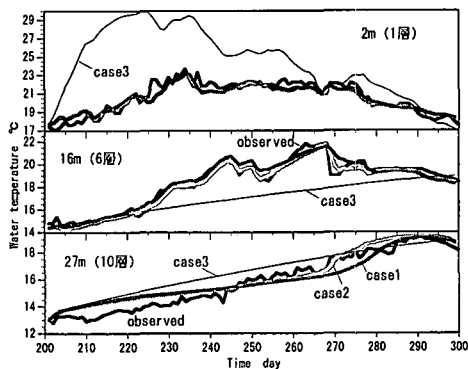


図-5 実測値と計算値の比較

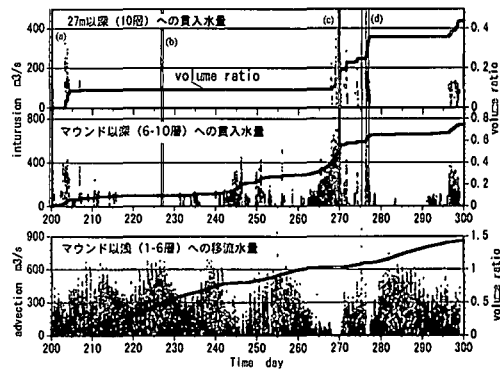


図-6 湾内への流入量 (計算値)

いる。(a), (c), (d) の期間に中～低層へ密度貫入が起きていることがわかる。

湾内底層 (10 層以深) への湾外水の貫入の頻度は高くないが、本観測期間では一度の貫入 (数～10 日間) で底層水の 10% 程度の湾外水が湾底に侵入しており、効率の良い海水交換が行われている (貫入による DO の増加, ⑥)。特に, 270 日頃 (期間(c)) の貫入では, 容積比 20% 以上の湾外水が湾内中下層への浸入によって底層で 2°C の水温上昇, 中層で約 3°C 水温低下しており, 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 → 4.4 mg/l) することがわかる。さらに, 湾外中層への密度貫入は降雨との対応がよく, 中層貫入によっても湾底層の DO 上昇に影響を与えている (245 日頃, 図-2) が考えられる。

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湾内密度の再現モデルを構築し, 海水交換機構について検討を行った結果, 以下のことが明らかになった。

(1) 湾内の水質は主に湾外水塊の流入 (台風時を除いて河川流出の影響は小さい) によって決定されており, 湾内外の密度差が小さいときには潮流, 大きいときには密度流が卓越する。

(2) 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 18 号が通過した 9 月 26 日頃には, 27 m 以深の容

積比 20% 以上の湾外水が湾内中下層への貫入によって底層で 2°C の水温上昇, 中層で約 3°C 水温低下しており, 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 → 4.4 mg/l) している。

(3) 湾外中層への密度貫入は降雨との対応がよく (湾外からの低密度水塊の浸入により湾内中層以浅の密度低下後の中層貫入), 中層貫入によっても湾底層の DO 上昇に影響を与えている。

(4) 湾外への淡水供給は河川からのみではなく, 湾周辺からの降雨流出等によって行われている。これらの水塊は湾内上～中層へ浸入し, 湾内の水塊密度を低下させ, 密度貫入による海水交換を促進させている。

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

- 岡田知也・中山恵介・日比野忠史・細川恭史・古川恵太 (2000): 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.
- 豊田政史・日比野忠史・西守男雄 (1999): 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.
- 日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一 (1999): 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.
- 日比野忠史・岡田知也・中山恵介 (2000): 湾内外の密度差による湾口部での流入機構, 水工学論文集第 44 巻, pp. 945-950.