

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.831

March 2015

東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災後の 大船渡湾の水質に関する研究

岡田 知也・古土井 健

Water quality after tsunami generated by the “Great East Japan Earthquake of 2011”,
in Ofunato bay

Tomonari OKADA, Ken Furudoï

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

東北地方太平洋沖地震に伴う津波被災後の大船渡湾の水質に関する研究

岡田知也*・古土井健**

要 旨

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波によって、大船渡湾の湾口防波堤が流失した。大船渡湾は水質改善に対して多大な努力を行ってきた水域であり、湾口防波堤の復旧に際しては、環境への配慮が重要であると考えられる。環境に対する配慮として、如何なる対策が有効であるかの検討に対して、現状の湾口防波堤が無い状態での水環境特性を把握し、湾口防波堤がある状態との比較を行うことは非常に有用である。そこで、本研究は、現在の湾口防波堤が無い状態での観測を実施し、湾口防波堤が無い状態での水環境特性を明らかにすること、および環境に配慮した湾口防波堤の復旧を考える際の留意点を明らかにすることを目的とする。

現地観測は、2012 年 9 月 18 日から 10 月 23 日および 2013 年 7 月 26 日から 11 月 25 日にかけて、水質、底質、および流況に関して行った。

調査の結果、次のことが明らかとなった。水質に関しては、①湾口防波堤が無い状況では、貧酸素水塊は形成されなかった、②底層の DO 濃度は、湾口防波堤がある状況と同じ減少率で低下していた、③月に数回の頻度で突発的に流入する湾外水の影響によって、貧酸素化は免れていた。底質に関しては、①底質は、被災前後でほぼ同じだった、②攪乱・再堆積の痕跡は、約 20 cm まであった。流況に関しては、湾口防波堤が無い状況の平均的な流況は、表層から水深 4 m は流出、水深 4 m から水深 15 m は流入、水深 15m から底層までは流出の 3 層構造だった。これらのことから、環境に配慮した湾口防波堤の復旧を考える際には、下層の流れの阻害を低減し湾内低層の低水温化を防ぎ、および突発的に湾外の底層から入ってくる低水温水塊が流入し易くする技術開発が重要であると考えられた。

キーワード：東日本大震災、津波、湾口防波堤、貧酸素水塊、底泥、大船渡湾

* 沿岸海洋・防災研究部海洋環境研究室長

** 東北地方整備局釜石港湾事務所長

〒 239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所

電話：046-844-5023 Fax：046-844-1145 e-mail: okada-t92y2@mlit.go.jp

Water quality after tsunami generated by the “Great East Japan Earthquake of 2011”, in Ofunato bay

Tomonari OKADA*

Ken Furudoi**

Synopsis

A tsunami protection breakwater in Ofunato bay was collapsed in the tsunami generated by the "Great East Japan Earthquake of 2011". A lot of endeavors to improve water quality were made in the bay. Therefore, we think that environmental consideration is essential for reconstruction of the tsunami protection breakwater. It is very useful to understand water quality characteristics under the condition without the tsunami protection breakwater, when we consider which measure is effective for the environmental consideration for reconstructing the tsunami protection breakwater. In this study, we aim to grasp the water quality characteristic under the condition without the tsunami protection breakwater and to clarify the points for the reconstruction of the tsunami protection breakwater with environmental consideration.

We carried out field measurements of water quality, sediment and current from September 18 to October 23, 2012 and from July 26 to November 25, 2013. Results of the field measurements showed the following. Regarding water quality, (1) anoxic water was not occurred under the condition without the tsunami protection breakwater, (2) DO concentration in the bottom layer decreased in the same ratio with the tsunami protection breakwater, (3) the anoxic water was prevented by intrusion of low temperature water from outside of the bay which occurred a few times a month. Regarding bottom sediment, (1) bottom sediment was almost same before and after the tsunami, (2) thickness of re-accumulation of sediment after the tsunami was about 20 cm. Regarding current, there were three layers, the first layer (from the surface to 4 m depth) was outflow, the second layer (from 4 m depth to 15 m depth) was inflow, and the third layer (from 15 m depth to the bottom) was outflow. Therefore, when we consider the reconstruction of the tsunami protection breakwater with environmental consideration, it is important that we devise for decreasing blocking the current in the third layer and the intrusion from the outside of the bay.

Key Words: the Great East Japan Earthquake, tsunami, tsunami protection breakwater, anoxic water, sediment, Ofunato bay

*Head of Marine Environment Division, Coastal, Marine and Disaster Prevention Department

**Director of Kamaishi Port Office

National Institute for Land and Infrastructure Management

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone: +81-46-844-5023 Fax : +81-46-844-1145 e-mail: okada-t92y2@mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 方法	3
2.1 水質	3
2.2 底質	3
2.3 流況	3
3. 結果	4
3.1 水質	4
3.2 底質	5
3.3 流況	6
4. 考察	9
4.1 水温	9
4.2 DO 濃度	9
4.3 流況	10
4.4 底質	11
4.5 環境配慮に向けて	12
5. まとめ	13
謝辞	13
参考文献	13

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって発生した津波によって、三陸沿岸に位置する港の防波堤および護岸をはじめとする港湾施設は甚大な被害を受けた。その一つである大船渡湾においては、湾口防波堤が流失した。

大船渡湾は、岩手県の南部に位置するリアス式形状の湾である（図-1）。リアス式形状の湾は、湾口から湾奥に向かって水深および湾の幅が減少し、波エネルギーを収斂するため、津波の影響が相対的に大きくなる。1900年以降だけでも、1933年の昭和三陸津波、および1960年のチリ地震津波の2度の津波被害が発生した地域である。

津波による被害を低減する目的で、湾口防波堤は、チリ地震津波を想定対象として、1967年に完成した。湾口防波堤は水深約36mの湾口部に設置された（図-2）。海底から水深10mまでが礫によるマウンド、その上にケーソンが設置された構造となっていた。南堤のケーソンの延長は291m、北側のケーソンの延長は244m、開口部の幅は201m、開口部の水深は16mであった。

このように湾口部の大部分を湾口防波堤で塞がれたため、大船渡湾の閉鎖度は高まった。また時を同じくして、流域圏人口の増加や養殖業の拡大に伴う流入負荷の増大（図-3）も重なった。その結果、大船渡湾は富栄養化状態となった。湾奥の底泥はヘドロ化し、底層水は貧酸素化することがしばしば起こった。この状態を改善するために、大船渡湾水質浄化対策マスタープラン（岩手県）や負圧を利用した海水交換装置式の設置（国土交通省東北地方整備局）等の水質改善対策が図られていた。

その大船渡湾において、津波によって、湾口防波堤が流出した。ケーソンはマウンドから落ち、礫積みマウンドは崩れて海底から高さ3m程度が残ったのみとな

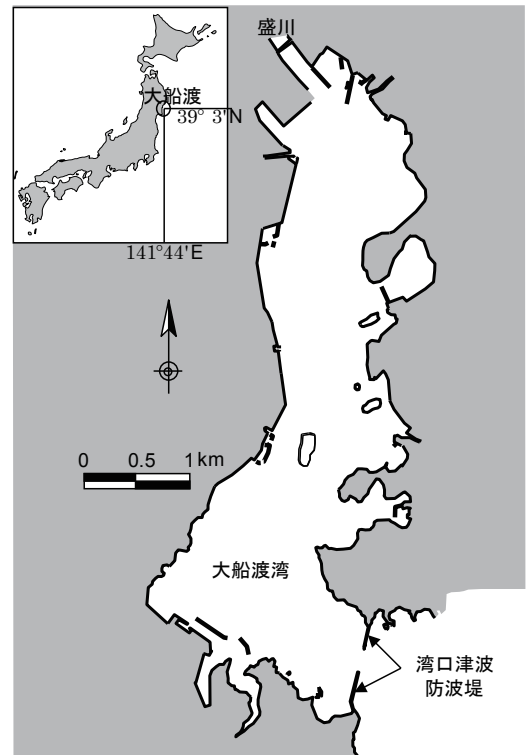


図-1 大船渡湾の位置と形状

り、湾口防波堤がほぼ無くなった状態となった。

前述したように、大船渡湾は水質改善に対して多大な努力を行ってきた水域であり、湾口防波堤の復旧に際しては、環境への配慮が重要であると考えられる。環境に対する配慮として、如何なる対策が有効であるかの検討に対して、現状の湾口防波堤が無い状態での水環境特性を把握し、湾口防波堤がある状態との比較を行うことは非常に有用である。

そこで、本研究では、現在の湾口防波堤がない状態での観測を実施し、湾口防波堤がない状態での水環境特性を明らかにすること、および環境に配慮した湾口防波堤

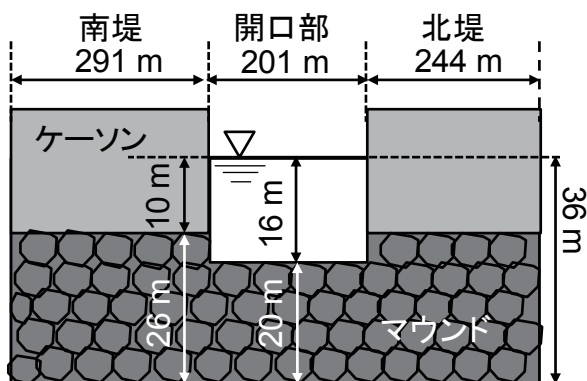


図-2 湾口防波堤の断面図

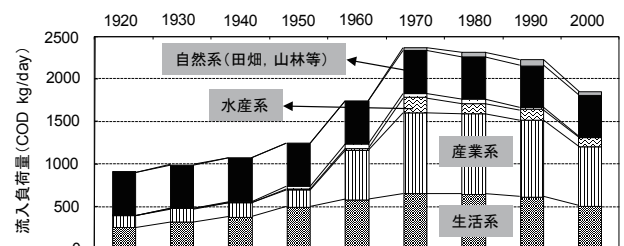


図-3 大船渡の流入負荷（COD）の変遷

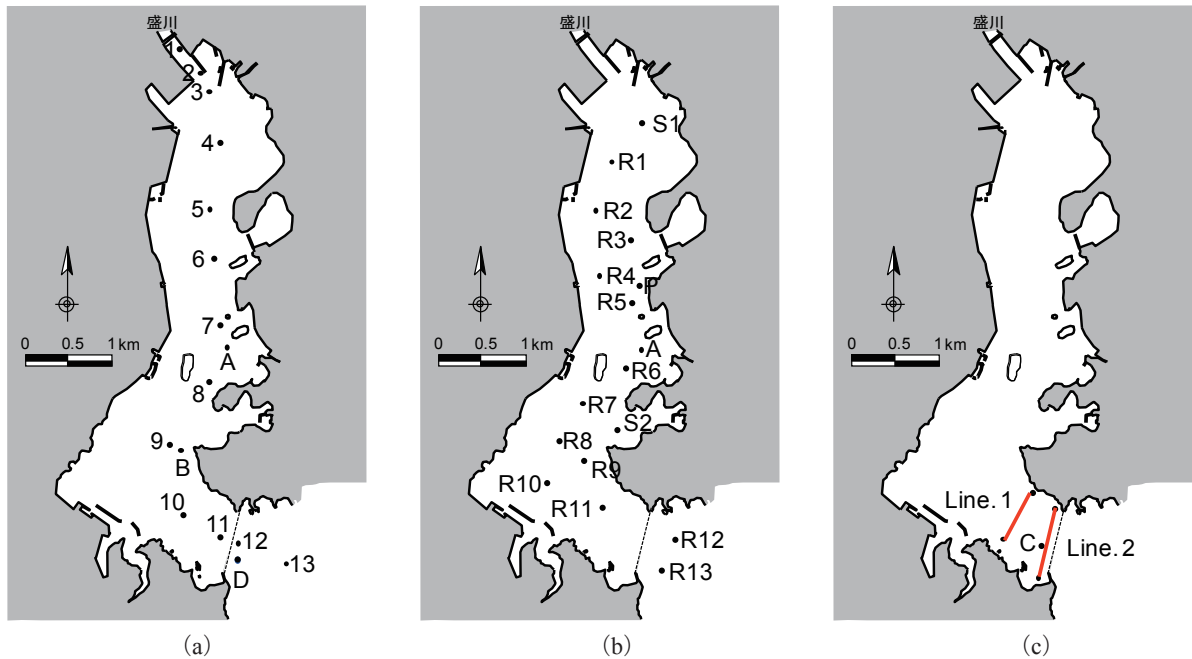


図-4 調査地点図. (a) 水質, (b) 底質, (c) 流況

表-1 調査内容. (a) 水質, (b) 底質, (c) 流況

(a)				
水質	項目	期間	地点	備考
連続観測	水温, 塩分, DO 濃度	2012 年 9/18-10/23, 2013 年 7/26-11/25	湾内 (Stn. A, Stn. B), 湾外 (Stn. D)	水 深: -2 m, -18 m, B+1 m (水温は 2 m 間隔)
鉛直分布	水温, 塩分, DO 濃度	2012 年 (3 回) 9/19, 10/4, 10/22, 2013 年 (6 回) 7/26, 8/27, 9/26, 10/25, 11/25	湾奥から湾外の 13 地 点 (Stn. 1-Stn. 13)	湾内外 15 地点 (海面か ら海底にかけて 0.1 m 間隔)
(b)				
底質	項目	期間	地点	備考
採泥分析	粒度組成	2012 年 9 月	Stn. R1-R13, Stn. S1, Stn. S2, Stn. A	湾内外 16 地点
採泥分析	環境指標	2012 年 9 月, 2013 年 8 月	Stn. S1, Stn. S2, Stn. A	強熱減量, 硫化物, COD, 含水率, 全窒素, 全リン, 酸化還元電位
柱状採泥	^{210}Pb , ^{137}Cs , ^{134}Cs , 含水率, 粒度組成, TOC	2012 年 9 月	Stn. P	0.5 m の柱状採泥
(c)				
流況	項目	期間	地点	備考
連続観測	多層流向・流速	2012 年 9/18-10/9, 2013 年 8/26-9/27	湾内 (Stn. C)	海底上 1 m から 1 m 間 隔に測定
曳航観測	多層流向・流速	2012 年 10/2, 10/3	湾口部の 2 測線 (Line. 1, Line. 2)	鉛直 1 m 間隔に測定

の復旧を考える際の留意点を明らかにすることを目的とする。

2. 方法

現地観測は、2012年9月18日から10月23日および2013年7月26日から11月25日にかけて、水質、底質、および流況に関して行った（村上ら（2013）、古土井ら（2014））。

2.1 水質

水温、塩分および溶存酸素（DO）濃度の連続観測を、湾内2地点（Stn. A, Stn. B）および湾外1地点（Stn. D）の3地点で実施した（図-4（a）、表-1（a））。水温には、水温計（HOBO WaterTemp Pro V2, クリマテック社製）を2mの層間隔で設置し、詳細な鉛直分布の時間変化を測定した。塩分にはCompact-CT（JFEアドバンテック社製）を、DO濃度にはCompact-DOW（JFEアドバンテック社製）を使用し、海面下2m、水深18m、海底上1mの3層で測定した。

水温、塩分およびDO濃度の鉛直分布を湾奥から湾外にかけた13地点（Stn. 1 - Stn. 13）で、2012年に3回、2013年に6回行った（図-4（a）、表-1（a））。測定には多項目水質計（AAQ-RINKO, JFEアドバンテック社製）を用い、海面から海底まで0.1m間隔で測定を行った。

2.2 底質

湾内16地点（Stn. R1 - Stn. R13, Stn. S1, Stn. S2, Stn. A）において、2012年9月に採泥を行い、粒度分布を分析した。また、湾内3地点（Stn. S1, Stn. S2, Stn. A）において、2012年9月および2013年8月に採泥を実施し、強熱減量、硫化物、COD、含水率、全窒素、全リンおよび酸化還元電位を分析した（図-4（b）、表-1（b））。採泥は、スミス・マッキンタイヤを用いて行った。

柱状採泥（50cm）を、湾内1地点（Stn. P）で、2012年9月に行った。採取した底泥を陸上で速やかに4cm間隔にスライスし、表-2に示す検体について $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs および含水率を分析した（図-4（b）、表-1（b）、表-2）。

2.3 流況

流速の鉛直分布の連続観測を、ADCP（RD社製600kHz）を用いて、湾内1地点（Stn. C）において、2012年9月18日から10月9日、および2013年8月26日

表-2 底泥コアのスライス位置および分析項目

層 (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	^{137}Cs	^{134}Cs	TOC	粒度分布	含水率	密度
0-1	○			○		○	○
1-2					○	○	○
2-3						○	○
3-4						○	○
4-5	○			○	○	○	○
5-6						○	○
6-7						○	○
7-8						○	○
8-9	○			○	○	○	○
9-10						○	○
10-11						○	○
11-12						○	○
12-13	○			○	○	○	○
13-14						○	○
14-15						○	○
15-16						○	○
16-17	○			○	○	○	○
17-18						○	○
18-19						○	○
19-20						○	○
20-21	○			○	○	○	○
21-22						○	○
22-23						○	○
23-24						○	○
24-25	○			○	○	○	○
25-26						○	○
26-27						○	○
27-28						○	○
28-29	○			○	○	○	○
29-30						○	○
30-31						○	○
31-32						○	○
32-33	○			○	○	○	○
33-34						○	○
34-35						○	○
35-36						○	○
36-37	○			○	○	○	○
37-38						○	○
38-39						○	○
39-40						○	○
40-41	○			○	○	○	○
41-42						○	○
42-43						○	○
43-44						○	○
44-45	○			○	○	○	○
45-46						○	○
46-47						○	○
47-48						○	○

から9月27日にかけて行った（図-4（c）、表-1（c））。鉛直方向には、海底上1mから1m間隔で測定した。

湾口部付近で湾を横断するラインを2本設定し（L1, L2）、調査船にADCP（RD社製600kHz）を艀装して曳航観測を、2012年10月2日および3日に行った（図-4（c）、表-1（c））。海面下4mから海底面まで、1m間隔に測定した。

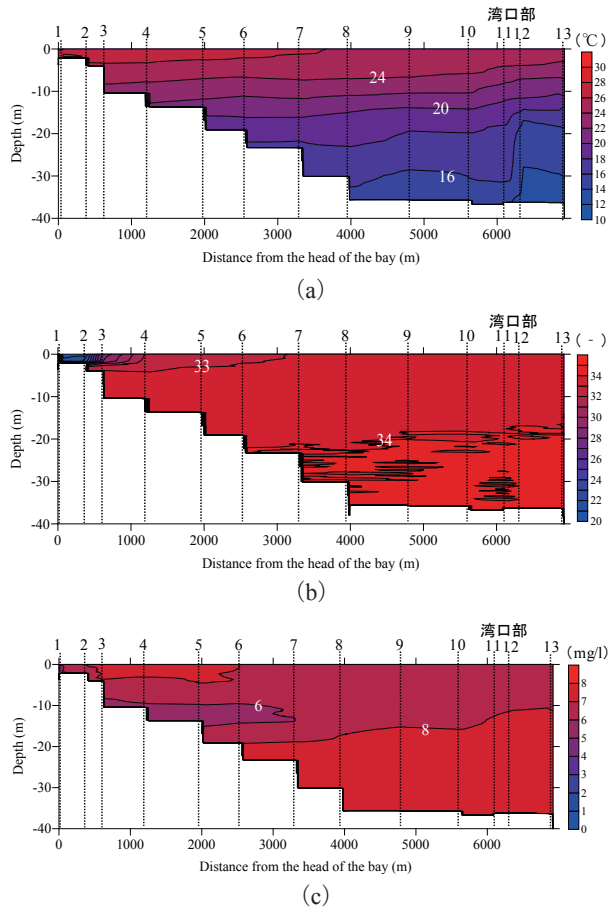


図-5 縦断面分布図 (2012 年 9 月 19 日)。(a) 水温, (b) 塩分, (c) DO 濃度

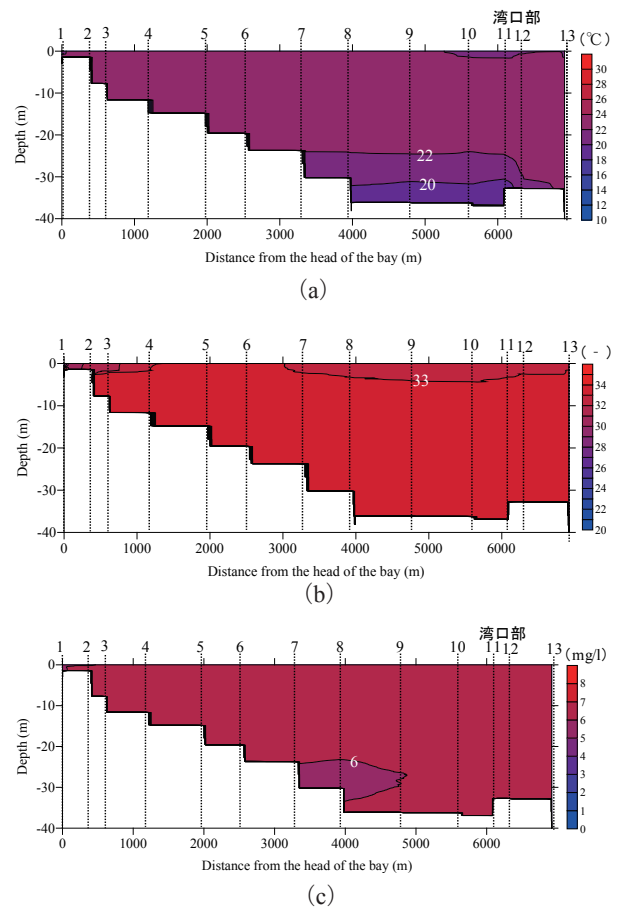


図-6 縦断面分布図 (2012 年 10 月 4 日)。(a) 水温, (b) 塩分, (c) DO 濃度

3. 結果

3.1 水質

(1) 縦断面分布

2012 年 9 月 19 日の水温の縦断面分布には、水深方向に減少傾向があったが、明確な躍層はなかった (図-5 (a))。水温は表層から底層にかけて、徐々に減少しており、表層は 25℃、湾奥から湾口にかけての水深 30 m 付近の底層は 16℃だった。表層は湾奥から湾外までほぼ一様に 25℃程度であったが、底層の水温は、湾口部を境にして湾外の方が約 1℃低かった。

湾奥部の塩分は、湾奥部に流入する盛川の影響により表層で 30 以下になっていたが、湾中央部と湾口部では、塩分はほぼ一様に 33 程度だった (図-5 (b))。水深 20 m 以下では塩分 34 であった。

湾内には貧酸素水塊は形成されていなかった (図-5 (c))。湾奥から湾口にかけての底層の DO 濃度は 8 mg/l の高い値であった。Stn. 4 から Stn. 7 にかけての水深 10

m 付近の DO 濃度は、周囲よりも相対的に小さかったが、濃度は 5 mg/l 以上だった。

2012 年 10 月 4 日の水温は、水平方向にほぼ一様だった (図-6 (a))。水深 25 m 以深で水温の低下があった。表層で 22℃、底層で 20℃だった。

塩分に対する盛川の影響は 2012 年 9 月 19 日と較べると小さく、湾奥部を除くと、塩分は、水平方向および鉛直方向にほぼ一様に 33 だった (図-6 (b))。

9 月と同様に、貧酸素水塊は形成されていなかった (図-6 (c))。Stn. 7 から Stn. 9 にかけての水深 30 m 付近の DO 濃度は、周囲と較べて相対的に小さかったが、濃度は 5 mg/l 以上だった。

(2) 時間変化

Stn. A の底層 DO 濃度は、2013 年 7 月から 10 月の観測期間中、1 週間から 2 週間の時間周期で、緩やかな減少と急激な上昇を繰り返していた (図-7)。DO 濃度は減少時に 4 mg/l まで低下することがあった。特に、9 月 23 日から 29 日の期間は、4 mg/l を下回った。しかし、

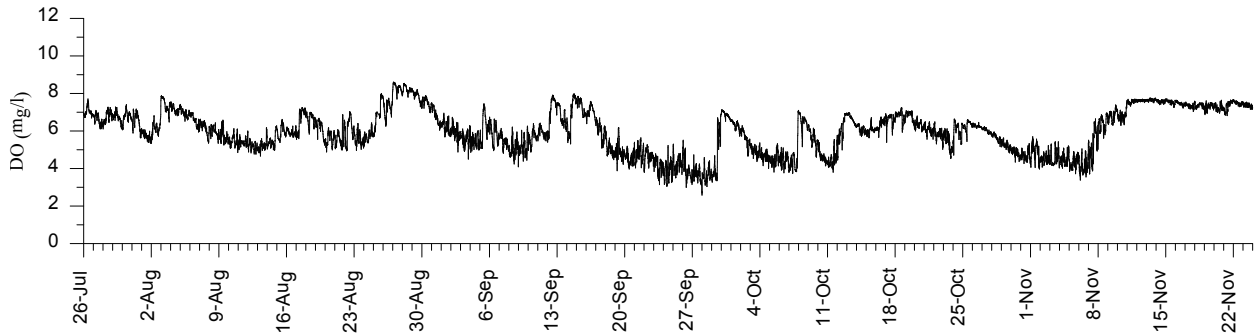


図-7 Stn. Aにおける底層の DO 濃度の時間変化 (2013 年)

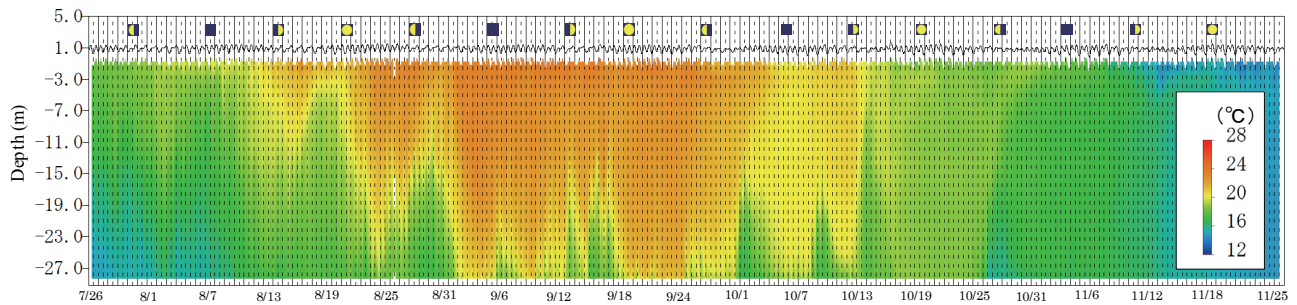


図-8 Stn. Aにおける水温の鉛直分布の時間変化 (2013 年)

3 mg/l (貧酸素化の目安値) を下回ることにはなかった。

図-7 の DO 濃度の時間変化と同時期の Stn. A における水温の鉛直分布の時間変化は、DO 濃度と同様に 1 週間から 2 週間の時間周期で、底層に低水温水塊が現れることを示していた (図-8)。この低水温水塊の出現と DO 濃度の急激な上昇のタイミングは一致していた。

9 月上旬から 10 月下旬までの期間では、水温は鉛直方向に様な状態が基本としてあり、湾外から下層に低水温水塊が明瞭なもので 6 回流入していた。この外海からの低水温水塊の湾内への影響の程度は、それぞれ異なっていた。9 月 6 日の流入時は低水温層は、底層から水深 23 m まで、9 月 13 日、9 月 16 日、10 月 1 日、10 月 9 日の流入時は底層から水深 15 m まで、10 月 13 日の時は底層から水深 5 m まで及んでいた。低水温水塊の底層での持続時間は、いずれの流入時も 3 日間程度だった。

3.2 底質

(1) 空間分布

湾内の全ての地点において、含泥率 (シルトおよび粘土の含有率) は 70% 以上であった (図-9)。

Stn. S1, Stn. A および Stn. S2 の 3 地点の底泥の分析結果は、底泥が富栄養化した状態のままであることを示した (表-3)。強熱減量は、3 地点において、14% 以上であった。硫化物濃度は、水産用基準の 0.2 mg/g-dry を

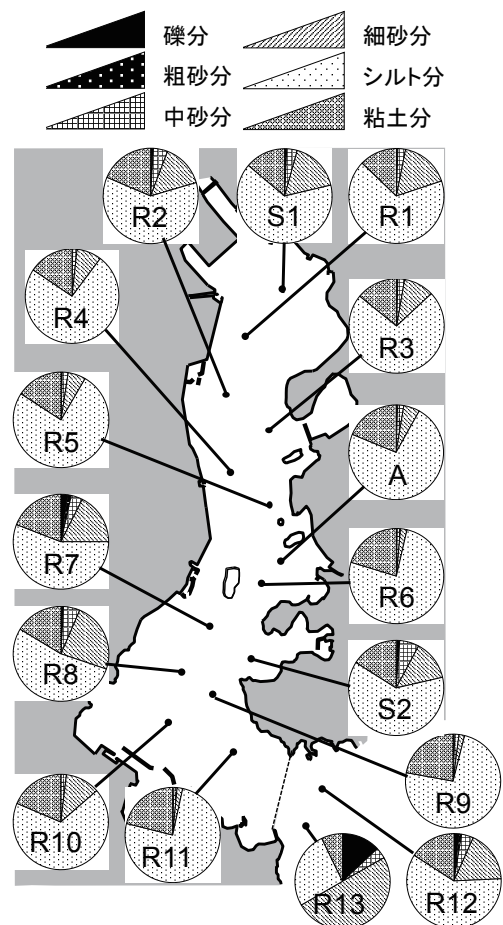


図-9 粒度組成の空間分布。円内の記号は地点番号。

表-3 底質の分析結果

計量項目	S1	A	S2
強熱減量 (%)	14.1	14.4	14.6
硫化物 (mg/g-dry)	0.80	0.64	0.56
COD (mg/g-dry)	24.2	26.7	27.5
含水率 (%)	53.7	61.8	59.9
全窒素 (mg/g-dry)	2.4	2.5	2.4
全リン (mg/g-dry)	0.74	0.86	0.76
酸化還元電位 (mV)	57	-15	-12

を超え、それぞれ 0.80 mg/g-dry, 0.64 mg/g-dry, 0.56 mg/g-dry であった。COD も、水産用基準の 20 mg/g-dry を超え、それぞれ 24.2 mg/g-dry, 26.7 mg/g-dry, 27.5 mg/g-dry であった。

(2) 鉛直コア

底泥の鉛直コアの外観から、表面から約 5 cm までの表面付近はシルト・粘土分が主体であった（図-10）。約 5 cm から約 20 cm までは、貝殻が顕著に見られ、貝殻と砂泥が混在した底泥であった。約 20 cm より下側はシルト・粘土分が主体の良くしまった感じの底泥であった。

含水率は、表層から 10 cm までは、鉛直方向の連続性に多少乱れがあるものの単調に減少していた（図-11 (a)）。含水率は表層では 70%、10 cm では 50% であった。10 cm から 20 cm では、含水率は鉛直方向の連続性が無かった。これは外観で見たように多く混入している貝殻の影響と思われる。20 cm より下側では、鉛直方向の連続性は強く、20 cm から 25 cm までに 45% から 50% に増加し、25 cm より下側はほぼ 50% で一様であった。

中央粒径（D50）は、含水率の鉛直方向の連続性がなかった 10-20 cm の層で大きくなっていた（図-11 (b)）。15-20 cm 層では、中央粒径が 0.1 mm 程度の砂であった。20 cm 以深は中央粒径が 0.01 mm 程度のシルトで一様であった。

TOC は、10-20 cm 層で、顕著に小さな値を示した。表層 5 cm と 20 cm 以深では 30 mg/g 程度であったのに対して、10-20 cm 層は 10 mg/g 程度であった（図-11 (c)）。

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ は 20 cm より上側の値が 20 cm より下側の値よりも小さかった（図-10 (d)）。一般的に、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ は下層に向かって減少する。しかし、データは逆の傾向を示していた。また、値が 10 以下で、表層の値としては非常に小さな値だった。

^{137}Cs は表層で 14 Bq/kg だった（図-10 (e)）。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の値が表層から 12 cm まで約 0.5 だった（図-10 (f)）。福島第一原子力発電所事故起源の Cs に対し

て、事故後 20 か月の $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ をそれぞれの半減期に基づいて計算すると、0.593 となる。したがって、表層から 12 cm までは、福島原発由来であると推測される。12 cm より下層では、 ^{134}Cs は検出されなかった。

3.3 流況

(1) 流速の鉛直分布の経時変化

湾口部（Stn. C）における水深 4 m から 15 m までの層の恒流成分（25 時間平均）は流入方向の頻度が高かった（図-12）。2013 年 8 月 28 日および 9 月 17 日には、流入方向に 10 cm/s 以上の流速が発生していた。期間平均値は流入方向に 2.8 cm/s であった。

一方、水深 15 m 以深は、流出方向の頻度が高かった。8 月 29 日から 9 月 2 日の期間および 9 月 16 日から 9 月 20 日の期間では流出方向に 5 cm/s 以上の流速が発生していたが、期間平均値は流出方向に 1.8 cm/s であった。

水深 4.4 m から水深 15.4 m 層（上層）と水深 16.4 m から水深 33.4 m 層（下層）の断面積算流量を算出した（図-13）。後述する横断面観測の結果（図-14 参照）を踏まえて横方向に流速は一樣と仮定した。前述したように、上層では流入が、下層では流出が卓越していた。上層（流入）および下層（流出）共に、大きい時には 400-500 m³/s であった。上層の期間平均値は流入方向に 178.0 m³/s、下層の期間平均値は流出方向に 108.3 m³/s であった。流出流量の差は、流出成分が 70 m³/s 少なかった。この差の要因の一つは、表層部が測定できなかったため、表層流出成分が考慮されていないことであると考えられる。

(2) 流速の横断面分布

図-14 に 2012 年 10 月 2 日の 14 時 18 分から 14 時 26 分にかけて曳航して測定した流速の横断面分布を示す。表層から水深 5 m までの層は流出、水深 5 m から 20 m までは流出、水深 20 m 以深は流出だった。横断方向に、流速が逆向きになることはなく、岸付近で流速が低下する程度でほぼ一様であった。

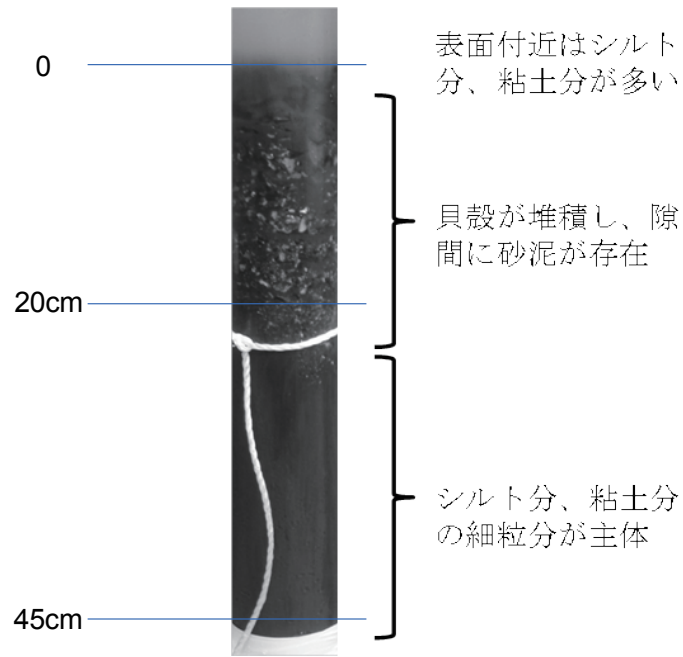


図-10 柱状採泥試料の外観

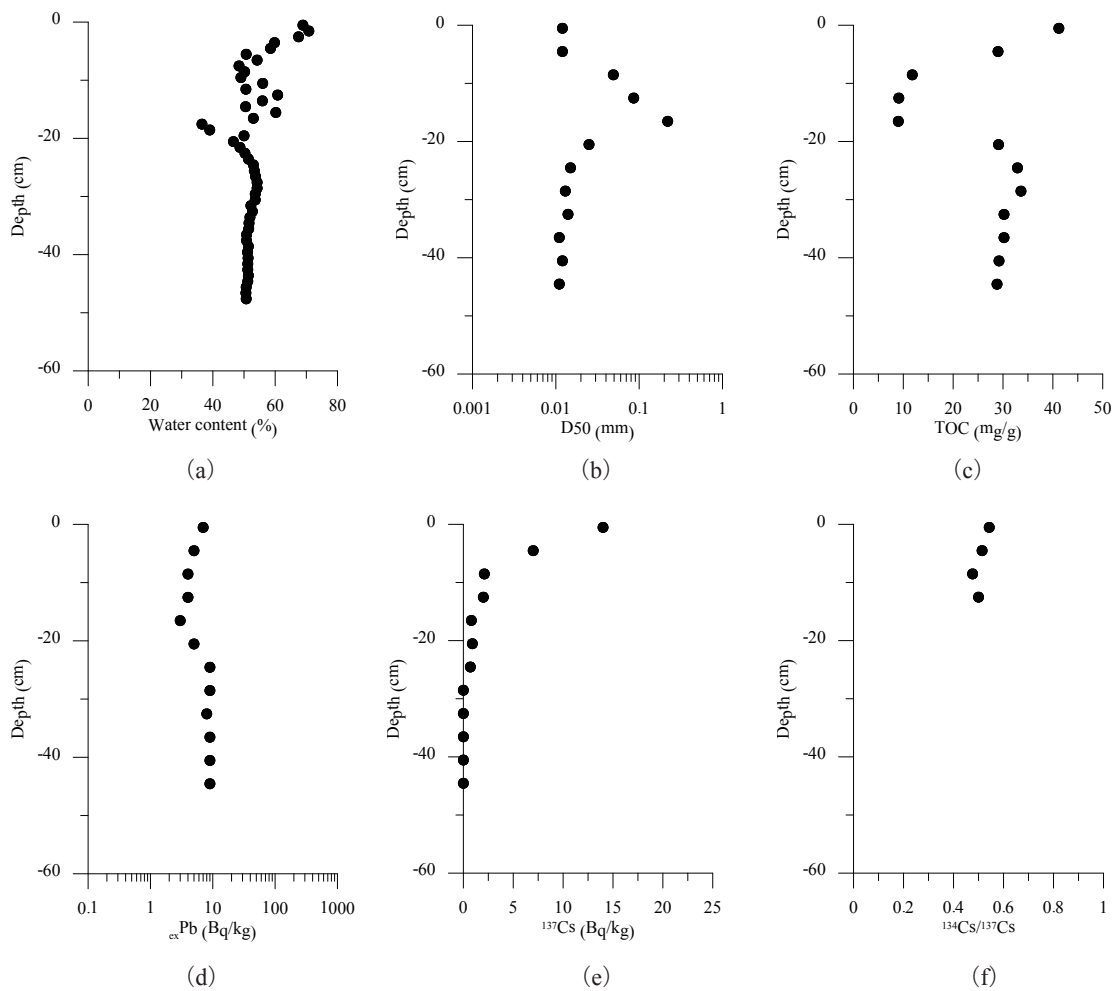


図-11 鉛直コアの分析結果. (a) 含水率, (b) 中央粒径, (c) TOC, (d) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, (e) ^{137}Cs , (f) $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$

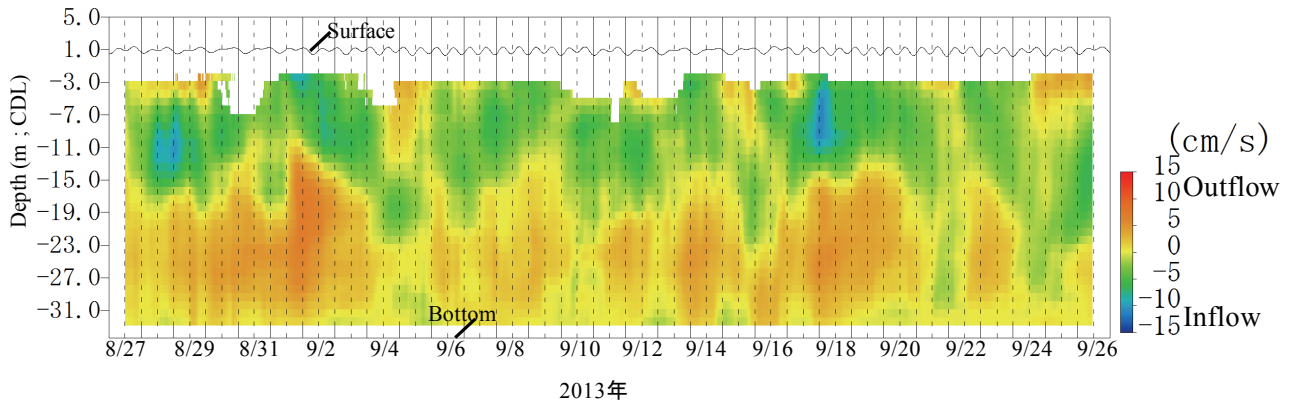


図-12 湾口部 (Stn.C) における流速 (25 時間平均) の鉛直分布の時間変化

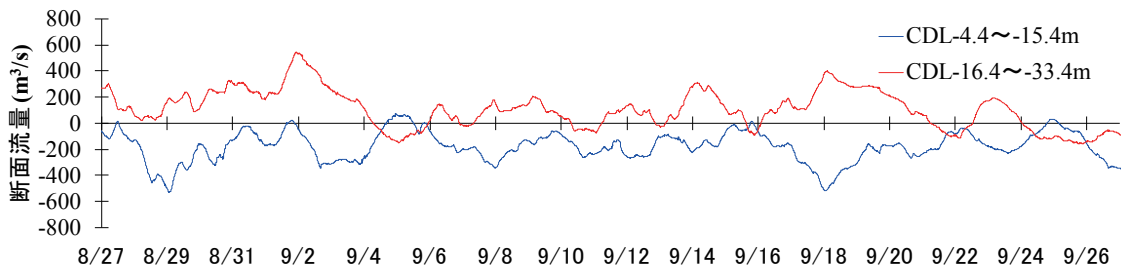


図-13 湾口部における断面積算流量 (25 時間平均) の時間変化

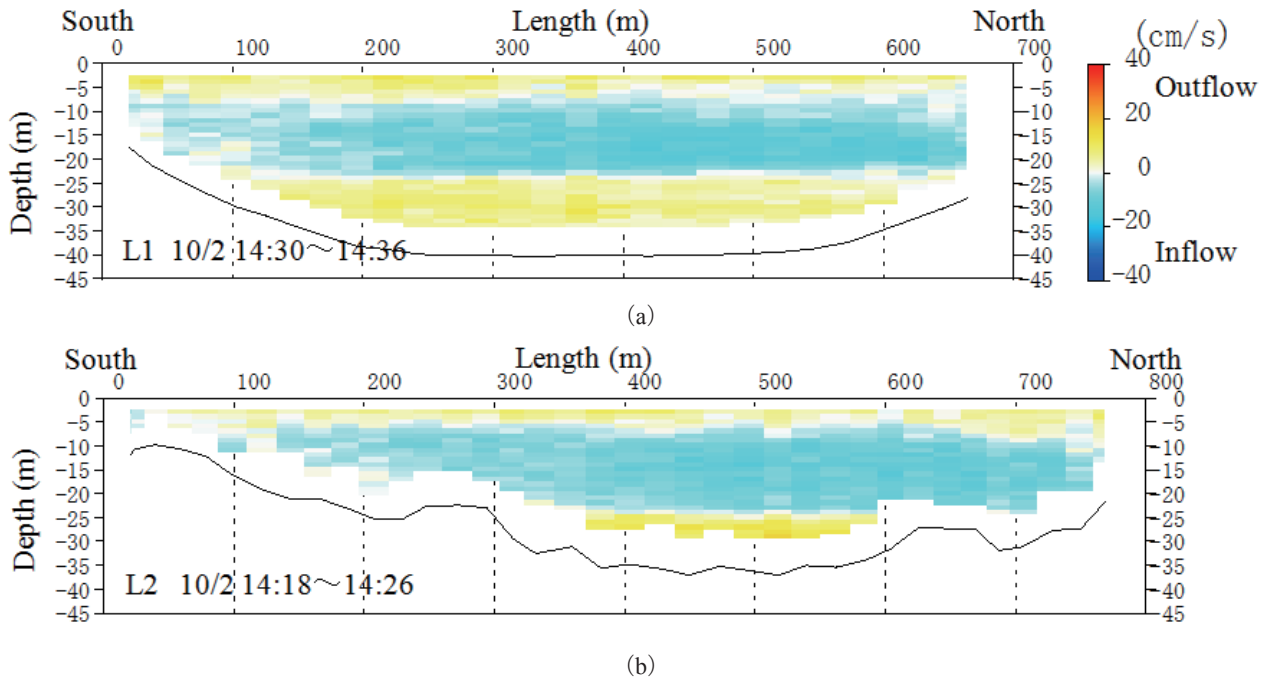


図-14 湾口部における流速の横断面図 (2012 年 10 月 2 日). (a) Line 1, (b) Line 2

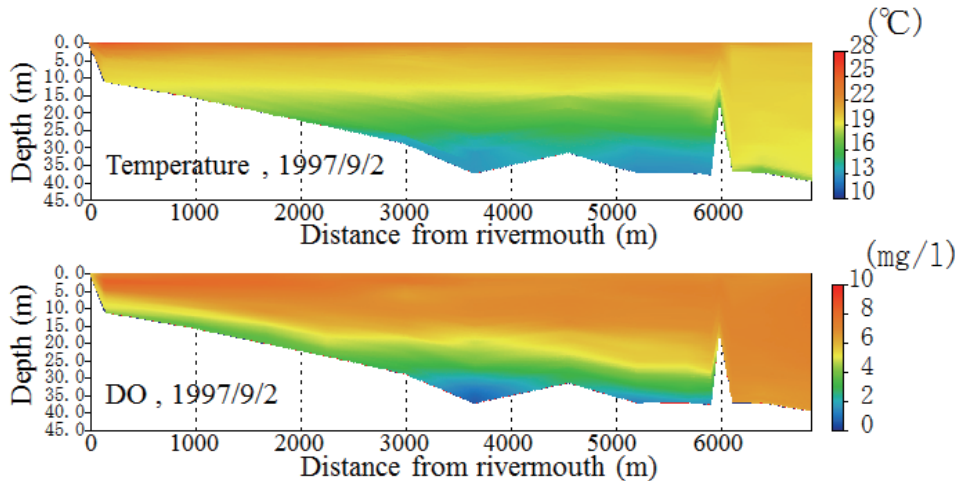


図-15 被災前の水質の縦断面図（1997年9月2日）. (a) 水温, (b) DO 濃度

4. 考察

4.1 水温

津波被災前の1997年9月に観測された水温およびDO濃度の縦断面図を図-15に示す。湾口防波堤が存在していた状況では、湾内において、マウンド天端付近の水深に強い躍層が形成され、その躍層より下層に湾外水よりも低水温の水塊があった。上層と下層の温度は約10℃あった。また、上層においては、湾外との温度差は無かったが、下層においては、湾内の方が5℃程度低かった。

被災後の2012年10月4日には、明確な躍層はなかった（図-6 (a)）。下層において、上層と比べて相対的に低水温の水塊があったが、温度差は2℃と小さかった。また、湾外との温度差は無かった。

一方、被災後の2012年9月19日は、下層に低水温水塊があったが（図-5 (a)）、これは外海からの低水温水塊が流入したタイミングに観測したためと考えられる。下層の塩分が湾外から連続して34以上になっていること、およびStn. D（湾口部）における9月19日前後の下層水温の低下から（図-16 (a)）、外海水の侵入によって生じたと考えられる。

Stn. D（湾口部）と大船渡湾沖の水温のJCOPE2による計算結果（宮澤ら, 2008）を比較すると、湾内底層に流入する水塊と同じ水温の層は、沖合では水深60 - 80 mの層の水塊に相当することが判る。これから、沖合では水深60 - 80 mの層の水塊が、内部潮汐波（岡寄, 1994）等の何らかの突発的な要因によって水深30 mまで上昇し、底面に沿って湾内に流入したものと考えられ

る。

よって、突発的な外海水の影響がない時の基本的な水温の鉛直分布は10月4日の様な分布であると考えることができる。基本的な状態として湾口防波堤の有無で水温の縦断面分布を較べると、湾口防波堤がある場合にはマウンド天端以深が上層および湾外と比べて低水温となるのに対して、湾口防波堤がない場合には水深方向に一樣、かつ湾内外の水温差が生じないと考えられる。

4.2 DO 濃度

被災前の2000年と被災後の2013年にStn. Pで観測した底層のDO濃度を比較した。DO濃度の減少が大きい9月14日付近のDO濃度の減少率は共に約0.4 g/m³/dayであった（図-17）。減少率が湾口防波堤があった時と同じであったことを考慮すると、もし、湾外から低水温水塊が流入しDO濃度が急激に上昇するような現象がなければ、湾口防波堤がない状況においても貧酸素水塊が形成されていた可能性が高い。

この湾外から低水温水塊が流入し、DO濃度が急激に上昇する現象は、湾口防波堤があった時から存在していた（岡田ら, 2000）。2000年のDO濃度のDO濃度の時間変化においてもDO濃度が急激に上昇する現象があったことが判る（図-17）。しかし、頻度は湾口防波堤がない場合の方が多く、また、DO濃度の上昇は湾口防波堤が無い場合の方が高かった。

4.1で示した様に低水温水塊は湾外の底層に沿って流入してくる。また、湾外からの低水温水塊の流入規模は、それぞれ異なり、大規模の場合には底層から水深5 mまで影響を及ぼすことがある一方、小規模の場合には底層

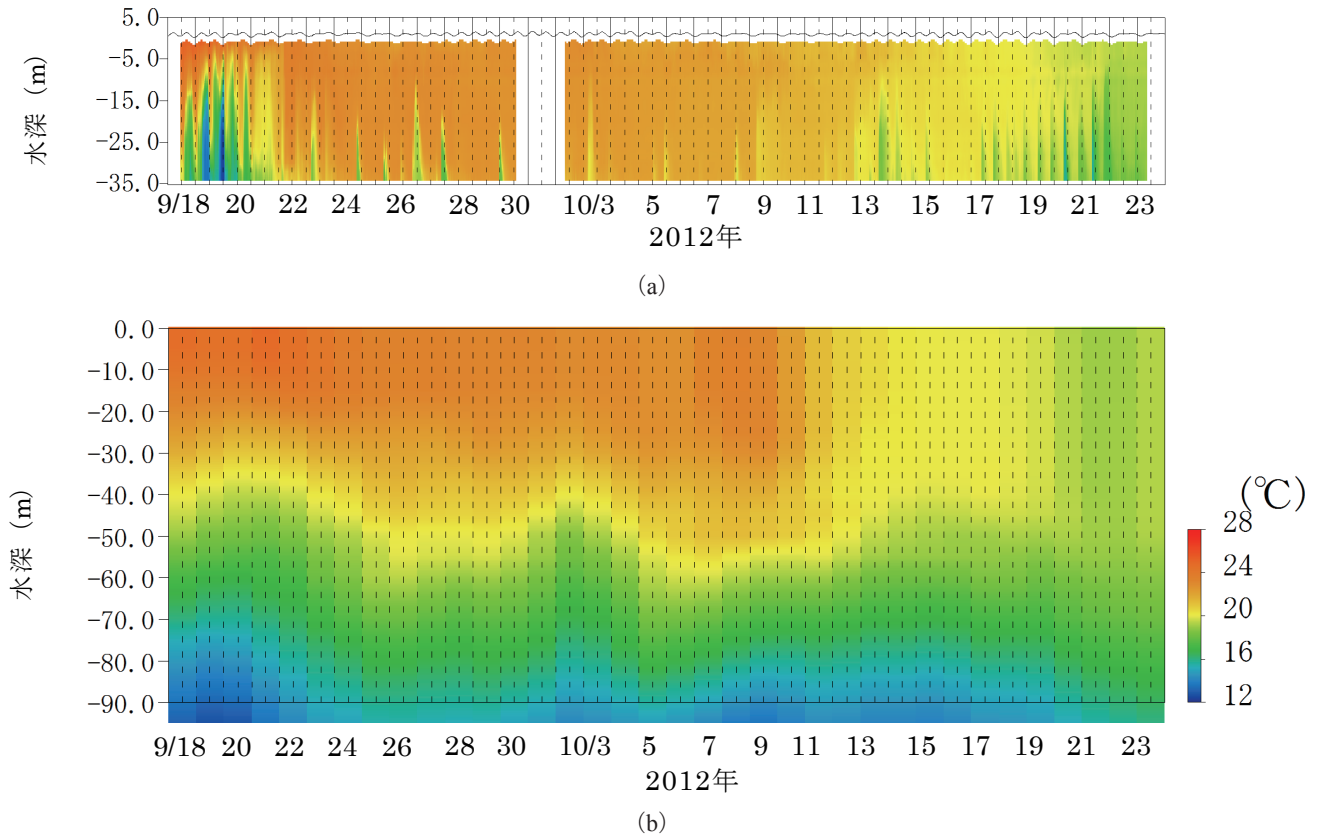


図-16 (a) Stn. D (湾口部) と (b) 大船渡沖 (JCOPE2) の水温鉛直分布の時系列の比較

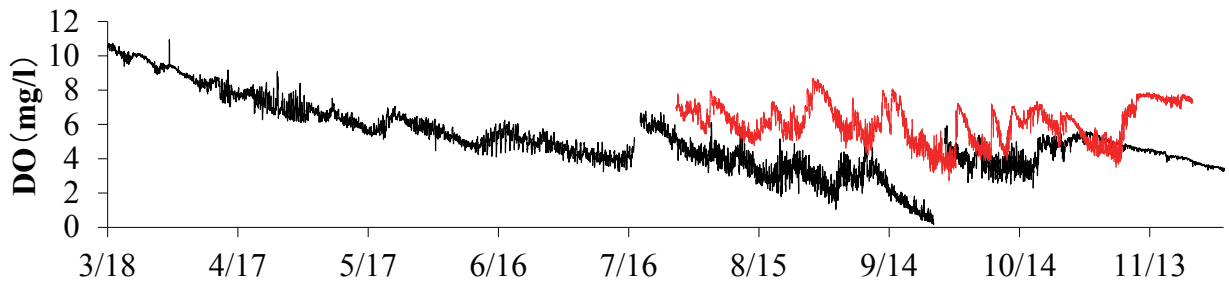


図-17 湾口防波堤がある場合と無い場合の DO 濃度の時間変化の比較. 黒：湾口防波堤がある場合 (2000 年), 赤：湾口防波堤がない場合 (2013 年).

から水深 23m までしか影響を及ぼさない (図-8). さらに湾口防波堤がある場合には湾内底層は突発的に流入する低水温水塊と同程度に低水温であるのに対して, 湾口防波堤が無い場合には湾内底層は低水温になっていない. これらから, マウンドがある場合には, 湾外から流入する低水温水塊の上面がマウンドより低い小規模の時には湾内に流入できない. また, マウンドを超えて湾内に流入しても湾内底層には同程度の密度の低水温水塊が存在するため, 底層へ影響が届き難い. それに対して, 湾口防波堤が無い場合には, 小規模な低水温水塊の流入

でも湾内に流入することができる. また, 底層は低水温ではないので, 湾外から低水温水塊は底層に直接影響を及ぼすことことができる. これらのことが, 外海からの低水温水塊の流入の頻度は, 湾口防波堤がない場合の方が多く, また, DO 濃度の上昇は湾口防波堤が無い場合の方が高かった大きな要因であると考えられる.

4.3 流況

湾口部における流速の鉛直分布の時間変化 (図-12) と横断面図 (図-14) から, 湾口防波堤が無い場合には,

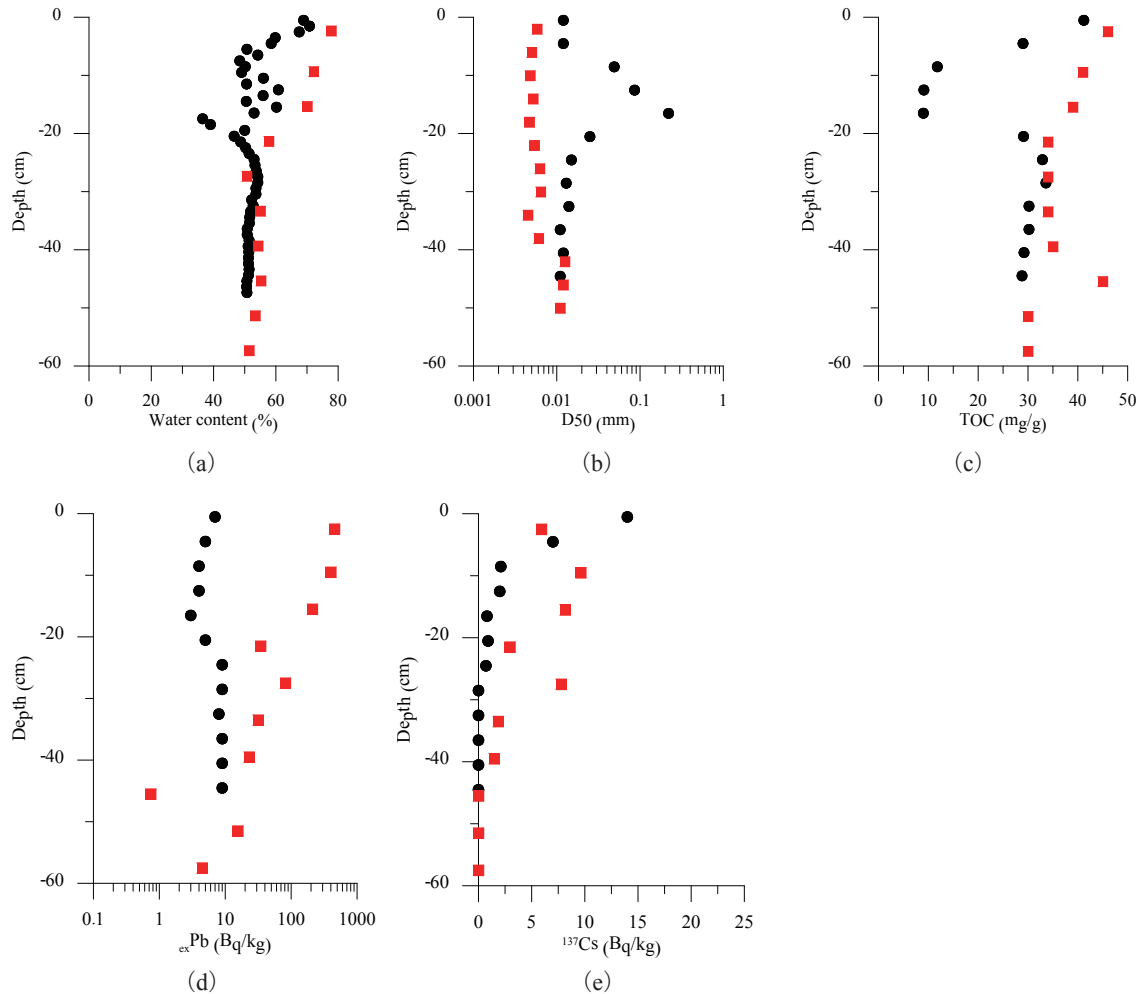


図-18 鉛直コアの分析結果. (a) 含水率, (b) 中央粒径, (c) TOC, (d) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, (e) ^{137}Cs . ●: 被災後 (2012 年), ■: 被災前 (2000 年)

表層から水深 4 m は流出, 水深 4 m から水深 15 m は流入, 水深 15 m から底層までは流出の 3 層構造が平均的な流況であると推測される. 被災前の湾口防波堤があった状態では, 開口部のマウンドの高さは水深 16 m の位置であることを考えると, 下層の流出が大幅に塞がれた状態になっていたと考えられる. 大船渡湾の底層の低水温化および水環境の悪化を防ぐためには, この下層の流れ阻害を低減する工夫が重要であると考えられる.

4.4 底質

含水率, 粒度, TOC の鉛直分布および福島第一原子力発電所事故由来の Cs の存在層から考慮すると, 底泥表層から泥深 20 cm までは, 津波後に再堆積した層であると考えられる. 被災前の底質の鉛直分布と比較すると, さらにそのことが明瞭になる (図-18).

被災前の中央粒径は底泥表層から泥深 40 cm まで, 一様に 0.01 mm 以下のシルトであったのに対して, 被災

後の中央粒径は泥深 18 cm 程度で 0.1 mm 以上の砂となっていた. そして, 泥深が浅くなるにつれて中央粒径が小さくなっていた. このことは, 再堆積の過程において, 沈降速度の速い砂成分から沈降し, その後に沈降速度が小さいシルト成分が沈降したと考えることができる.

被災前の底泥表層の $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ は 300 Bq/kg であったのに対して, 被災後の底泥表層の $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ は 10 Bq/kg 程度と小さかった. この値は被災前の泥深 50 cm 程度の値に相当する. したがって, 被災後の底泥表層の底泥は被災前の泥深 50 cm 程度および 50 cm 以深の底泥を含んでいる可能性がある.

被災後の底質は, シルトが主体であり, 強熱減量, TOC, COD, 硫化物は水産用基準よりも高かった. 表-4 に湾奥 Stn.S2 に近い地点の 2011 年のデータを示す (岩手県沿岸広域振興局, 2011). 強熱減量, 硫化物, COD, 含水率, 全窒素および全リンとともに, 同程度の値であった. 「津波によって, 湾内のヘドロが一掃され,

表-4 被災前の底質（湾奥）（岩手県沿岸広域振興局，2011）

計量項目	
強熱減量（％）	14
硫化物（mg/g-dry）	0.56
COD（mg/g-dry）	28
含水率（％）	57.9
全窒素（mg/g-dry）	2.9
全リン（mg/g-dry）	1.2

底質は改善されたのでは？」と言われていたが、そのような状態にはなっていなかった。一部は陸上に遡上し、一部は湾外に流出したと考えられるが、多くの底泥は湾内で場所を変えて再堆積した推測される。津波によって物理的な攪乱（水平移動、鉛直混合）は受けているものの、質は大きくは変わっていないと考えられる。

4.5 環境配慮に向けて

被災前後で底質の変化が無いこと、および湾口防波堤が無い場合の底層の DO 濃度の減少率が湾口防波堤があった場合の減少率と同じだったことから、湾口防波堤

が復旧した後は、被災前と同様に貧酸素水塊が発生することが危惧され、復旧の際には何らかの環境配慮が望ましい。

湾口防波堤が無い状態で湾内底層に貧酸素水塊が形成されなかった要因として次のことが明らかになった。

- ・湾口防波堤が無い場合には、小規模な湾外からの低水温水塊の波及も湾内に流入すること（図-19（c））。
- ・湾外底層は恒常的に湾内から湾外の流れがあり、湾内の成層化を弱めていること。
- ・湾内底層が低水温にならない（水温成層が弱い）ため、湾外から流入する低水温水塊が底層に直接影響を及ぼすこと（図-19（d））。

したがって、湾口防波堤の復旧に際しては、下層の流れの阻害を低減し、突発的に湾外の底層から入ってくる低水温水塊が湾内底層に流入し易くする技術の開発が重要であるとする。

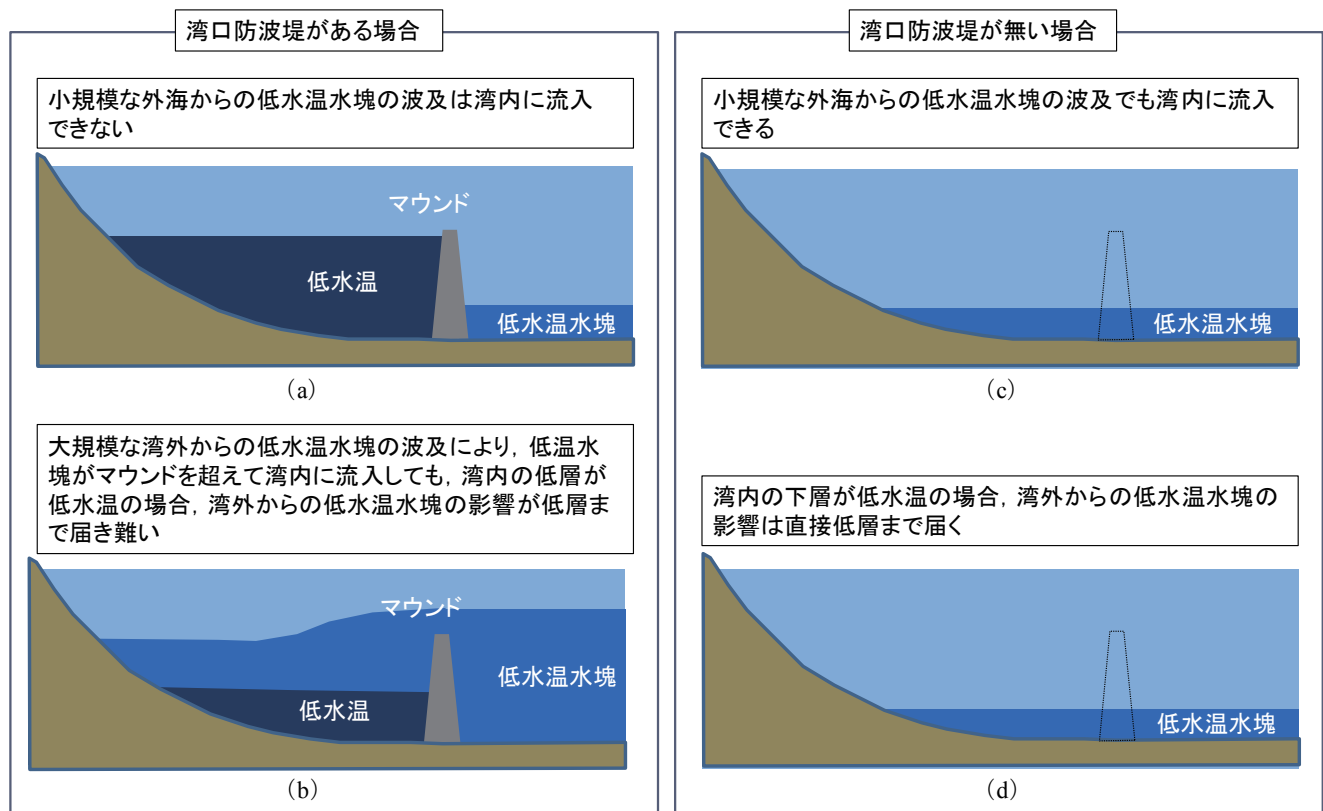


図-19 湾口防波堤がある場合と無い場合の湾外からの低水温水塊の流入および影響の違い

5. まとめ

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波によって湾口防波堤が流失した大船渡湾において、湾口防波堤がない状況での水質調査を実施し、湾口防波堤がない状況の水環境特性を把握した。得られた特徴を次に示す。

水質

- ・湾口防波堤がない状況では、貧酸素水塊は形成されなかった。
- ・底層の DO 濃度は、湾口防波堤がある状況と同じ減少率で低下していた。
- ・月に数回の頻度で突発的に流入する湾外水の影響によって、貧酸素化は免れていた。

底質

- ・底質は、被災前後でほぼ同じだった。
- ・攪乱・再堆積の痕跡は、約 20cm まであった。

流況

- ・湾口防波堤がない状況の平均的な流況は、表層から水深 4 m は流出、水深 4 m から水深 15 m は流入、水深 15 m から底層は流出の 3 層構造だった。

また、湾口防波堤が無い状態で湾内底層に貧酸素水塊が形成されなかった要因は、

- ・小規模な湾外からの低水温水塊の波及も湾内に流入すること。
- ・底層には恒常的に湾内から湾外の流れがあり、湾内の成層化を弱めていること。
- ・湾内底層が低水温にならないので、湾外から流入する低水温水塊が底層に直接影響を及ぼすことができること。

であった。

これらのことから、環境に配慮した湾口防波堤の復旧を考える際には、

- ・下層の流れの阻害を低減し、湾内の低層が低温になることを防ぐこと
- ・湾外の底層から入ってくる突発的な低水温水塊が湾内底層に流入し易くすること

が重要であると考えられた。

(2015 年 2 月 16 日受付)

謝辞

本研究は、大船渡港湾口防波堤復旧に係る水質保全対策検討会の一環として実施したものであり、(故) 堺茂樹 岩手大学学長を委員長とした検討会の成果を反映したものである。堺先生のご冥福をお祈り申し上げると共に、深く感謝いたします。また委員長はじめ検討会委員である東京都市大学名誉教授村上和男氏、横浜国立大学教授中村由行氏および富士常葉大学准教授阿部郁男氏には多くのご指導を頂いた。さらに、岩手県水産技術センター、岩手県、大船渡市から有益な情報を提供して頂いた。地元の漁業関係者には、大船渡湾の環境に関する有益な意見および現地観測への協力を頂いた。ここに記して心から感謝の意を表する。

参考文献

- 岩手県沿岸広域振興局 (2011) : 大船渡湾水質・底泥調査業務委託報告書, 45 p.
- 岡寄守良 (1994) : 三陸沿岸の海湾における海水交換と変動現象, 沿岸海洋研究ノート, Vol. 32, No. 1, pp. 15-28.
- 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, Vol. 47, pp. 1041-1045.
- 宮澤泰正・小松幸生・瀬藤聡 (2008) : 数値海況予測システム JCOPE2 による黒潮・親潮混合域の再現性, 海と空, Vol.84, pp.85-91.
- 村上明宏・堺茂樹・村上和男・中村由行・岡田知也・高尾敏幸・柴木秀之 (2013) : 東北太平洋沖地震津波後の大船渡湾の水質・底質の現状, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, pp.496-500.
- 古土井健・堺茂樹・村上和男・中村由行・阿部郁男・岡田知也・柴木秀之・高尾敏幸 (2014) : 現地観測データによる大船渡湾海域環境の影響要因の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, pp.426-430.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 831 March 2015

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5018