東日本大震災後の釜石湾における海域環境変化

山本光夫,^{1*} 加藤孝義,² 多部田 茂,³ 北澤大輔,⁴ 藤野正俊,⁴
小豆川勝見,⁵ 松尾基之,⁵ 田中 潔,⁶ 道田 豊⁶

(2014年5月20日受付, 2014年10月8日受理)

¹東京大学海洋アライアンス, ²東京大学大学院工学系研究科, ³東京大学大学院新領域創成科学研究科,

⁴東京大学生産技術研究所, ⁵東京大学大学院総合文化研究科, ⁶東京大学大気海洋研究所

Changes in the coastal environment in Kamaishi Bay after the Great East Japan Earthquake

MITSUO YAMAMOTO,^{1*} TAKAYOSHI KATO,² SHIGERU TABETA,³ DAISUKE KITAZAWA,⁴
MASATOSHI FUJINO,⁴ KATSUMI SHOZUGAWA,⁵ MOTUYUKI MATSUO,⁵ KIYOSHI TANAKA⁶
AND YUTAKA MICHIDA⁶

¹*Ocean Alliance, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8564*, ²*School of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656*, ³*Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8561*, ⁴*Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8505*, ⁵*Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8902*, ⁶*Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan*

We investigated the effects of the Great East Japan Earthquake on the coastal environment of Kamaishi Bay, Iwate Prefecture, Japan and its restoration process. We analyzed the concentrations of nutrients and heavy metals in seawater, and the concentrations of radioactive materials in sediments. Dissolved inorganic nitrogen, $\text{PO}_4\text{-P}$, and $\text{SiO}_2\text{-Si}$ during March 2012 to November 2013 showed altered patterns of seasonal variation compared with before the disaster. This is attributed to the destruction of the breakwater in the mouth of the bay. Seawater concentrations of Cd, Pb, Cr, Zn, As and Se were below or equal to the accepted environmental standards in Japan. Although radioactive materials (^{134}Cs and ^{137}Cs) produced by the Fukushima nuclear accident were detected in sediments of Kamaishi Bay, they were only found in low concentrations. The concentrations increased gradually during the first half of the investigation, then decreased and remained constant during the latter half of the observation. Our results show that by November 2013, 2.5 years after the earthquake, the coastal environments in Kamaishi Bay had recovered from the effects of the disaster.

キーワード：栄養塩, 海域環境変化, 釜石湾, 重金属, 東日本大震災, 放射性物質

東日本大震災により発生した津波による水産関係の被害は、北海道から千葉県までの7道県において特に甚大なものとなっており、水産関係施設の被害額は総額1兆2,637億円にも達している。¹⁾ 水産業は、漁業従事者だけではなく、水産流通業、水産加工業、造船業など多くの関連業者によって成り立っているが(山本光夫, 国際環境経済研究所 web: <http://ieei.or.jp/2011/05/opinion110523/>, 2014年8月11日), その基盤となるのが漁場(沿岸)環境といえる。したがって、津波が沿岸域の環境に与えた影響を評価することは、生態系保全

の観点だけでなく水産業の復興にとっても重要であり、東北マリンサイエンス拠点形成事業(web: <http://www.i-teams.jp/>, 2014年8月11日)をはじめ、震災後より数多くの調査・研究が行われてきている。²⁻⁷⁾

沿岸環境・海洋生態系は、津波による瓦礫の流出と海底への堆積、藻場・干潟の消失、また重油をはじめとした陸上からの汚染物質の流出²⁾などにより大きく変化している。更に津波の直接的な影響だけでなく、福島第一原子力発電所の事故によって拡散した放射性物質の影響も存在している。この影響は原子力発電所周辺海域の汚

* Tel : 81-4-7136-6415. Fax : 81-4-7136-6418. Email : mitsuo@aori.u-tokyo.ac.jp

染だけに留まらず, 大気拡散によって陸域に運ばれた放射性物質が, 降雨等により河川を通じて沿岸域に流れ込む可能性が考えられる。

これらを踏まえると, 地震・津波が沿岸環境に与えた影響は, (1)生態系の変化, (2)海洋(海域)汚染の可能性, に大きくは分類できると考えられる。²⁾(1)については, 震災直後の生態系の変化に関する調査³⁻⁷⁾とともに, その回復過程を科学的に明らかにすることを目的とした調査^{2,3)}など, 幅広い研究が行われている。例えば, 宮城県の気仙沼湾・舞根湾においては, 震災直後より水質, 動植物プランクトン, 魚類をはじめとした総合的な生物環境調査が行われているなど, 沿岸生態系変化とその回復過程についての知見が次第に蓄積されている。^{2-4,8)}このような調査に加え, 各県の水産試験場においてもモニタリング調査等が再開されている(岩手県水産技術センター <http://www2.pref.iwate.jp/~hp5507/>, 気仙沼水産試験場 Web: <http://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kesenmuma-s/>, 2014年8月11日) 状況もあり, 震災後の沿岸環境についての知見は多く集まりつつある。一方で(2)については, 特に放射性物質の影響に関する多くの調査・研究がなされている。この中で海洋への汚染に関する研究は2つのアプローチがあり, 一つは福島第一原子力発電所から直接海洋に流出した放射性物質の総量や拡散の見積もりに関する研究⁹⁾がある。もう一つは陸域に沈着した放射性物質が雨水とともに河川に運搬されることに着目した研究である。¹⁰⁾前者の濃度変化は潮流が大きな要因であるのに対して, 後者の沿岸域における濃度変化は局所的な環境(流入河川の後背地, 土壌, 陸域への沈着量)に大きく影響されることから, 継続的な実測によって環境を評価する手法が採られている。

このような中で我々は, 岩手県釜石湾において震災後の海域環境調査を行ってきた。この調査では, 生態系の基盤をなすといえる水質に着目し, 特に栄養塩の変化のモニタリングにより, 「(1)生態系の変化」に関する評価を行うことを目的とした。それと共に, 海水中の重金属, および釜石湾の底質中における放射性物質濃度の変化をモニタリングすることによって, 津波による「(2)海域環境汚染の可能性」の有無を評価することを目指した。前者(1)で栄養塩に着目した理由としては, 水温, 塩分, 透明度, 溶存酸素量は, 岩手県水産技術センター等において震災後の2011年9月より定期調査^{11,12)}が行われている一方で, 植物プランクトンの挙動とも密接な関係がある栄養塩の変動については十分な公表データが存在していないためである。したがって, 塩分, 溶存酸素などのデータと組み合わせることで, 新たな海域環境の知見を得ることができると期待される。後者(2)については, 放射性物質を中心として水産物への海洋汚染に

関する風評被害が水産業で広がっている現状を踏まえて, 海域汚染の有無について評価する必要があると考えられる。本研究では, 海域環境変化を栄養塩の変動により考察し, 重金属および放射性物質の変化をモニタリングすることで, 特に水産物への影響の可能性を評価・検討することにした。

材料と方法

調査は, 2012年3月~2013年11月にかけて原則として2か月ごとに行った。但し, 最後の2回については天候の関係等により約3か月の間隔で実施した。調査・観測地点をFig. 1に示す。海水および底質のサンプリングを行ったが, 湾内のSt. 1-17については船上から, St. A-Eについては岸壁から実施した。採水は表層および底層について行い, 表層は船上からは基本的に直接採水, 岸壁からはバケツにて採水を行った。また底層についてはバンドン式採水器を用いた。なお, 岸壁からは海底から50 cm程度, 船上からは海底から1 m程度上の箇所まで採水を行っている。採泥に関してはエクマンバージ式採泥器を利用した。

海水については, 栄養塩および重金属の分析を実施した。栄養塩測定用の試料は, 採水時に0.45 μm のフィルターにてろ過を行い実験室へ冷凍輸送した。測定には栄養塩自動分析装置(BLAN + LUEBBE, TRAACS 2000)を用い, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$, そして $\text{SiO}_2\text{-Si}$ を分析した。重金属については, ポリ容器に密閉採水を行い冷蔵輸送した後, 実験室にて分析を行った。重金属の測定項目は, 震災前の当海域のデータが十分に存在しないこともあり, 環境基準値(<https://www.env.go.jp/kijun/mizu.html>, 水質汚濁に係る環境基準について, 2014年4月2日)が存在するカドミウム(Cd), 鉛(Pb), クロム(Cr), ヒ素(As), セレン(Se)および亜鉛(Zn)とした。分析には, 海水の直接分析が可能である誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS, Agilent 7500)を使用し, 手順としては海水試料を10倍希釈して酸性条件下(硝酸添加)にて測定を行い, 得られた分析値から濃度を換算した。一方で底質は, サンプリング後に密封状態で冷蔵輸送を行い, 実験室にて110°Cで少なくとも2時間以上乾燥させた後に粉碎してU-8容器にて入れ, ゲルマニウム半導体検出器(Princeton Gamma-Tech, MCA8016)によってセシウム134(^{134}Cs)およびセシウム137(^{137}Cs)の分析を行った。なお底質はFig. 1に示したサンプリング地点の中で, 採泥可能な場所のみで実施した。また採水についても, 調査日の海象条件等によってすべての地点で実施できたわけではなく, 特に岸壁からは復旧・復興作業が進む中で採水自体ができなくなった箇所(St. A-D)も存在した。したがって以下では, 調査期間を通じてサンプリン

Fig. 1 Sampling stations of seawater and sediments in Kamaishi Bay.

グが実施できた St. E, 1, 3, 7 の 4 地点を中心に結果を記述することとする。

結 果

栄養塩の変化 Fig. 2 に St. E, 1, 3, 7 における無機態窒素濃度 ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ の合計, Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN) の 2012 年 3 月以降の濃度推移を, Figs. 3, 4 に同じく無機態リン濃度 ($\text{PO}_4\text{-P}$), および二酸化ケイ素 ($\text{SiO}_2\text{-Si}$) の推移を示す。Figures 2, 3 より, DIN と $\text{PO}_4\text{-P}$ は 4 地点において以下に示すような濃度が周期的に上下する同じ傾向を示していることが確認された。2012 年および 2013 年ともに, 表層および底層において春季 (3 月) に高い濃度となり, 5 月以降から夏季に濃度が減少し, 秋からまた濃度が上昇していることが示された。また, 甲子川河口に近い St. 1 や小河川が流入する平田漁港・岩手県水産技術センター付近の St. E について, 全体を通して表層の方が底層よりも N, P とともに濃度が高いことがわかる。一方で, 湾口に比較的近い St. 7 では, 表層よりも底層の方が濃度は高くなっており, St. E, St. 1 と St. 7 の中間程度に位置する St. 3 では表層と底層の濃度差がそれほど大きくないことが示されている。次に Fig. 4 をみてみると, Si は N, P ほどに明確な傾向性はみられないものの, 特

に底層については N, P と同じ傾向を示していることがわかる。以上より, 釜石湾における栄養塩濃度は 3 月頃に最も高く, それ以降夏季までは下がり, 秋季にはまた高くなる傾向を示すことが確認された。

海域環境汚染の可能性

1. 重金属 今回行った 6 種の重金属の環境基準値 (「水質汚濁に係る環境基準」, 上限値) は, Cd: 0.003 mg/L, Pb: 0.01 mg/L, Cr (Cr(VI)): 0.05 mg/L, As: 0.01 mg/L, Se: 0.01 mg/L (以上, 「人の健康の保護に関する環境基準」), Zn: 0.01 mg/L (「生活環境の保全に関する環境基準」生物特 A) である。分析は, 2012 年 11 月を除いた 2012 年 3 月～2013 年 7 月の調査において行った。Table 1 は 2012 年 3～7 月の分析結果であるが, 全てのサンプルにおいて環境基準値を下回る結果が得られた。また 2012 年 9 月以降についても, Cd, Pb, Cr, As そして Se は, 調査期間を通じて環境基準値を超える値はみられなかった。Zn は, 0.01 mg/L を超える値も得られたが, 「水生生物の生息する水域」として規定されている生物 A の基準値 0.02 mg/L 以上の値, あるいはオーダーが変わるほど大きな値は無かった。以上より今回の分析からは, 水質中の重金属濃度については環境基準に照らした場合には津波による大きな影響はみられないことが示唆された。一方で, 調査期間にわたっ

Fig. 2 Change of DIN concentration in Kamaishi Bay.

てサンプリングを行っている St. E, 1, 7 について, 環境基準値以下であっても濃度変動がみられるか検討を行ったが, 震災後時間の経過とともに重金属濃度が減少するといった傾向は見られなかった。

Fig. 3 Change of inorganic phosphorus (PO₄-P) concentration in Kamaishi Bay.

2. 放射性物質 Table 2 に 2012 年 3 月, 5 月, そして 7 月に採泥した全地点での試料の分析結果を示す。St. 2, 9 および 12 では測定限界値以下の値もみられるが, それ以外の全ての地点において ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs が検

Fig. 4 Change of $\text{SiO}_2\text{-Si}$ concentration in Kamaishi Bay.

出された。2012年3月の分析値は、St. Cが最も高く、それ以外の地点では ^{137}Cs は10.3 Bq/kg以下である。2012年5月の分析値は3月と同様にSt. Cにおいて高

いが、St. 2や4では20 Bq/kgを超える濃度を示しており、濃度レベルは低いものの増加傾向にある可能性が示唆された。2012年7月はSt. Cで濃度が下がったものの、St. 1や6でやや濃度が上昇している。一方で、2012年9月以降の調査ではほとんどの採泥地点で放射性セシウム濃度は検出限界値以下であった。このことから、堆積物表面の放射性セシウムが時間の経過とともに海域内で移動していることが示された。比較のため2012年7月に海上保安庁によって行われた調査¹³⁾における仙台湾 ($38^{\circ}16.8\text{-N}$, $141^{\circ}09.7\text{-E}$, 水深 24 m), 東京湾 ($35^{\circ}35.1\text{-N}$, $139^{\circ}52.9\text{-E}$, 水深 14 m) の ^{134}Cs と ^{137}Cs 濃度を合わせて載せた。

St. 1については、 ^{137}Cs が調査期間を通じて検出されたため、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の濃度変化をFig. 5に示した。これをみると、St. 1では、2012年3月以降に放射性セシウム濃度の上昇がはじまり2012年9月に ^{134}Cs , ^{137}Cs ともに最大値を示している。その後2013年2月には濃度が減少し ^{137}Cs の濃度はほぼ一定を推移し、 ^{134}Cs は検出限界以下になっている。Table 2に示されているSt. Dの値などと比較すると、釜石湾内でも場所によって、底質中の放射性セシウム濃度の挙動に違いがあることが示唆された。

考 察

栄養塩の変化 本研究においては、N, P, Si濃度ともに概ね冬期に高く、夏期に低いという傾向があることが示されたが、ここではその挙動に関して他の水質や降水量データを利用して震災前との比較を行う。Figures 6, 7は、2010年3月～2011年2月の気仙沼湾 (Figs. 6a, 7a) および志津川 (Figs. 6b, 7b) 湾におけるDINおよび $\text{PO}_4\text{-P}$ の濃度変化を示したものである。ここで気仙沼湾および志津川湾を選択したのは、湾内の定点において栄養塩を含めた水質調査が震災前より毎月行われているためである。公表されている震災前の観測値のうち、Figs. 6, 7においては、気仙沼湾は台ノ沢 (Stn. 4), 志津川湾はStn. ②のデータを示している。なお、本稿では震災前に行われた調査地点は既往文献等の表記のまま示すこととし、本研究の調査地点と区別するために調査地点を“Stn.”で表し、一方で本研究の調査地点は“St.”で表すこととする。

Figures 6および7をみると、釜石湾のDIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ ともに、特に底層については、気仙沼と志津川と季節的变化・傾向性が一致していることがわかる。表層については、降雨等による河川流入の影響を受けやすいため、若干季節的傾向が異なる時期があるが、少なくとも夏期については濃度が低いという特徴は一致している。したがって震災後の釜石湾内の栄養塩変化は、震災前の近隣の海域の季節変化と同様な傾向がみられることが示唆さ

Table 1 Concentrations of heavy metals in Kamaishi Bay in March, May and July, 2012

Element	2012			2012			2012			2012		
	March	May	July	March	May	July	March	May	July	March	May	July
	Cd			Pb			Cr			As		
Standard value [mg/L]	0.003			0.01			0.05			0.01		
										0.01 (0.02)		
St. 1	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 2	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 3	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 4	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St. 5	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St. 7	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 8	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 9	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St. 11	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St. 12	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 16	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. 17	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
St. A	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. B	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. C	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. D	Surface	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
	Bottom	<0.003	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01
St. E	Surface	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01
	Bottom	—	<0.003	<0.01	<0.01	<0.01	—	<0.05	<0.05	—	<0.01	<0.01

—: no sample.

Table 2 Concentrations of radioactive materials in Kamaishi Bay sediments

Site	^{134}Cs (Bq/kg-dry)			^{137}Cs (Bq/kg-dry)		
	March, 2012	May, 2012	July, 2012	March, 2012	May, 2012	July, 2013
St. A	5.08 ± 0.595	—		10.3 ± 1.16	—	
St. B	—	—	16.8 ± 1.85	—	—	25.6 ± 2.72
			32.2 ± 3.32			56.9 ± 5.22
St. C	35.5 ± 3.02	34.0 ± 1.25	7.99 ± 1.01	57.8 ± 3.90	50.0 ± 2.57	12.3 ± 1.43
St. 1	5.81 ± 0.751	5.45 ± 0.744	12.5 ± 1.20	8.64 ± 1.02	13.1 ± 1.43	26.1 ± 2.08
St. 2	n.d. (<3.27)*	13.2 ± 1.13	n.d. (<4.50)	5.55 ± 0.977	24.0 ± 1.88	6.11 ± 1.06
St. 4	—**	14.9 ± 1.25	—	—	30.0 ± 2.14	—
St. 5	—	—	11.1 ± 1.44	—	—	25.5 ± 2.21
St. 6	4.08 ± 0.735	—	18.6 ± 1.44	6.96 ± 0.894	—	26.5 ± 2.12
St. 8	—	—	9.04 ± 1.13	—	—	15.8 ± 1.85
St. 9	—	8.31 ± 1.18	n.d. (<4.78)	—	13.9 ± 1.53	7.51 ± 1.30
St. 12	n.d. (<3.81)	n.d. (<3.04)	4.23 ± 0.92	4.25 ± 1.28	5.42 ± 1.00	11.5 ± 1.46
Site	July, 2012			July, 2012		
Sendai Bay ($38^{\circ} 16.8' \text{ N}, 141^{\circ} 09.7' \text{ E}$)	165 ± 0.9			264 ± 1.2		
Tokyo Bay ($35^{\circ} 35.1' \text{ N}, 139^{\circ} 52.9' \text{ E}$)	40 ± 0.5			66 ± 0.7		

* n.d.: not detected, ** —: no sample.

Fig. 5 Change of ^{134}Cs and ^{137}Cs concentrations at St. 1. Detection limit (3σ) of ^{134}Cs and ^{137}Cs are ~ 6 Bq/kg. Radioactivity below the detection limit is indicated as zero.

れた。

釜石湾の海域環境を考える際に、大きな影響を与えると考えられるものとして、湾口防波堤の存在が挙げられる。東北の港湾の中で、震災前より湾口防波堤が建設されていた場所として久慈湾、釜石湾、大船渡湾があるが(国土交通省東北地方整備局 web: <http://www.thr.mlitt.go.jp/>, 2014年8月11日), 釜石湾口防波堤は世界最大水深(−63 m)を有していた(国土交通省東北地方整備局釜石港湾事務所 web: <http://www.pa.thr.mlitt.go.jp/kamaishi/bousai/bouhatei/bouhatei-kamaishi.html>)。津波によって釜石の湾口防波堤は破壊されており、それに起因する湾内環境の変化が考えられる。具体

的には、外洋の海水流入による貧酸素化の解消や塩分の変化などが考えられる。小家は、震災後に釜石湾内外において多項目水質計での定期的な観測を行った結果、表層以外での塩分について、震災前は湾内外で傾向性が一致しなかったものが、震災後は傾向が一致していることを確認している(未公表)。また、岩手県水産技術センターによる震災後の漁場環境調査¹²⁾においては、「震災前の低酸素化は低減された」との報告があり、湾口防波堤破壊による流動環境の変化が釜石湾内に影響を及ぼしていることが示唆されている。これらのことから、溶存酸素や栄養塩など他の水質の傾向にも変化が生じた可能性が考えられる。

栄養塩については、震災前数年間の年間通じてのデータは存在しないものの、2007年に釜石湾内6地点および湾外の3点についてモニタリング調査が行われている¹⁸⁾。春季(2007年4月18, 24日, 5月16日), 夏季(2007年7月20, 25日, 8月3, 9日), 秋季(2007年10月18, 24, 30日, 11月8日)に採水・分析が実施されており、湾内6地点のうち2地点(Stn. 2およびStn. 3)がFig. 1のSt. 3およびSt. 7に比較的近い。同じ地点での比較でなければ震災前後の違いに関する正確な考察は困難であるが、気仙沼湾や志津川湾の震災前データと合わせることで、変化の傾向性は把握できると考えられる。そこで、今回の調査におけるSt. 3, St. 7の5, 7, 11月の分析値と対応するStn. 2, Stn. 3の2007年における観測値との比較をFig. 8のグラフより考察する。Figure 8a, bは、春期, 夏期, 秋期における震災前(Stn. 2, Stn. 3, 2007年)と震災後(St. 3, St. 7,

(a) Kesennuma

(b) Shizugawa

Fig. 6 Differences of seasonal variation of DIN between Kesennuma Bay (a) and Shizugawa Bay (b).

2012 年および 2013 年) の DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度を示したものである。震災前については、塩分 (salinity, グラフ上部) も合わせて示している。

冬期のデータがないため結論づけるのは難しいが、震災前の栄養塩挙動は、気仙沼湾や志津川湾のように夏期の底層濃度が低いわけではなく、特に DIN の季節的傾向性は一致していないと言える。更に Fig. 8 以外の観測データも含めると、表層部分に関しては同じ季節でもバラツキが大きいことが示されている。これは、湾内の水質環境が、河川からの流入量の増減や海象条件等に影響されやすい可能性が考えられる。実際に塩分を見てみると、底層付近は値がほぼ一定であるのに対して、表層部分は大きく変動していることがわかる。一方で底層の栄養塩濃度は、表層ほどバラツキが大きいことが、必ずしも気仙沼湾や志津川湾の栄養塩の挙動との一致はみられない。これらのことから震災前と異なる傾向として、震災後の栄養塩の挙動は、夏期の栄養塩濃度が春期や秋期に比べて低いことが改めて示唆された。理由として、震災前は湾口防波堤の存在によって外洋水との混合が少なかったことが可能性の一つとして考えられる。Figures 2-4 において、甲子川河口に近い St. 1 と湾口

(a) Kesennuma

(b) Shizugawa

Fig. 7 Differences of seasonal variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ between Kesennuma Bay (a) and Shizugawa Bay (b).

に近い St. 7 の季節変動を比較すると、St. 1 の方が表層と底層の濃度差が大きい。Table 3 は、多項目水質計のデータのある 2012 年 3-9 月の採水地点・深度における塩分であるが、栄養塩の濃度差の大きい 2012 年 5 月は、St. 7 に比べて St. 1 では塩分に差があり、栄養塩の濃度差も St. 1 の方が大きい。更に Fig. 9 は 2012 年 7, 9 月, 2013 年 5, 7 月の St. 1 における水温、塩分の深さ方向のプロファイルを示しているが、Fig. 2 の St. 1 において表層と底層の濃度差が非常に大きい時期 (2013 年 7 月) は塩分成層が非常に強くなっている (Fig. 9d)。表層と底層の濃度差がほとんど無い時期 (2012 年 7, 9 月, 2013 年 5 月) は塩分成層が弱いことがわかる (Fig. 9a-c)。なお、2013 年 5, 7 月のデータは採水日のものではなく近い日付のものを示している。

このように、河川水の流入による塩分成層の形成が栄養塩の濃度差に影響を及ぼすことが示唆されたが、降水量データからも更なる考察をここで行う。Table 4 は、2012 年と 2013 年の釜石における月毎の降水量 (気象庁 <http://weather.time-j.net/Stations/JP/kamaishi>, 2014 年 4 月 11 日) である。濃度差の大きい 2012 年 5, 9, 11 月, 2013 年 7 月 (観測は 8 月 1 日), 10 月 (観

Fig. 8 DIN and PO₄-P concentrations inside Kamaishi Bay before and after the disaster: (a) DIN, (b) PO₄-P. Pre-disaster salinity is indicated as a white bar graph in the figures.

測は11月6日)は200 mmを超えていることがわかる。一方でその他の月について日間変動データを見ると、2012年3月は調査の4日前と3日前にそれぞれ10, 20 mmの雨量を記録している。逆に2012年7月は月間雨量自体も少ないが、調査前1週間にわたって降雨が確認されていない。このことから、表層と底層の栄養塩濃度差は河川流入量が影響しており、St. 7に比べSt. 1は甲子川河口に近いためにその影響が大きいことが示唆された。このように釜石湾内では、2012年以降は津波自体による栄養塩の大きな濃度変動というよりも、湾口防波堤破壊による季節的挙動の変化がみられる可能性が示された。

更にこれを明らかにするために、釜石湾外のSt. 16およびSt. 17の栄養塩と塩分データと震災前のSt. 16付近のStn. 8の比較を行ったのがTable 5である。2012年7月のSt. 17は震災前に比べて濃度が低く見受

けられるが、DIN, PO₄-Pともに概ね震災前と濃度が同程度であることが示されており、湾外では湾内ほど震災前後で変化をしていない可能性が示唆された。St. 16とStn. 8の位置は完全には一致していないものの、震災前後の傾向性の変化はある程度把握できたと考えられる。

震災後の湾内環境の変化については、岩手県水産技術センターにおいても2011年9月から調査が行われている^{11,12)}。この調査では、水質は透明度、水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル a 、底質・底生生物は粒度組成、COD, T-S, マクロベントス出現種類数・多様度指数のモニタリングが行われている。その中で底質・底生動物調査では、マクロベントスの汚染指標種の分布から、2011年度調査では海底攪乱の影響が示唆されているが、翌年(2012年度)の調査においては、底質も震災前の状態に戻りつつあると考察されている。本調査結果では、海底攪乱の影響と思われる結果は得られなかった

Table 3 Change of salinity at the surface (0.1 m) and bottom of St. 1, St. 3 and St. 7 in 2012

		March 27	May 23	July 24	September 25
St. 1	Surface	32.92	31.50	32.54	32.91
	Bottom	33.33	33.53	33.85	33.53
St. 3	Surface	32.84	32.65	32.96	32.7
	Bottom	33.34	33.56	33.89	33.53
St. 7	Surface	—	32.57	—	—
	Bottom	—	33.51	—	—

が、湾口防波堤破壊によって水質環境は変化している可能性が明らかとなった。

今回得られた震災後の栄養塩と塩分変化の傾向性は、春期～秋期の限られた観測データからの考察である。湾口防波堤破壊との明確な関係性を述べるためには、定期的モニタリング調査を引き続き行い、有意差を検定により示すなど更なる考察が必要と考えられる。また震災前と同じ地点でも同様の調査を行うことも重要であると言えるが、水質変化への湾口防波堤破壊の影響の可能性が示されたこと自体に本研究の意義があると考えられる。

Fig. 9 Profile of temperature and salinity in seawater at St. 1: (a) July 2012, (b) September 2012, (c) May 2013, (d) July 2013. The solid line is salinity and the dashed line is temperature.

Table 4 Precipitation (mm) in Kamaishi in 2012 and 2013

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
2012	24	57.5	123.5	126.5	389.5	221.5	55.5	25.5	272	156	207.5	184
2013	33	13.5	10	160.5	36.5	46	397	81.5	170	344.5	50	71.5

Table 5 DIN and PO₄-P concentrations beyond Kamaishi Bay before and after the disaster

Before the disaster (2007)		Spring		Summer	
		April 16	May 17	July 19	July 31
Stn. 8 (surface)	DIN (μ M)	1.35	0.58	1.67	0.784
	PO ₄ -P (μ M)	0.179	0.116	0.163	0.133
	Salinity (psu)	33.15	33.67	33.08	—
Stn. 8 (20 m)	DIN (μ M)	2.41	2.49	2.48	0.611
	PO ₄ -P (μ M)	0.205	0.227	0.251	0.141
	Salinity (psu)	33.67	33.72	33.82	—
Stn. 8 (30 m)	DIN (μ M)	2.68	2.81	5.58	1.24
	PO ₄ -P (μ M)	0.214	0.226	0.332	0.145
	Salinity (psu)	33.71	33.75	33.99	—
After the disaster (2012)		Spring		Summer	
		May 23		July 24	
St. 16 (surface, 0.1 m)	DIN (μ M)	0.830		1.19	
	PO ₄ -P (μ M)	0.098		0.091	
	Salinity (psu)	32.64		33.42	
St. 16 (bottom, 25 m)	DIN (μ M)	0.456		1.41	
	PO ₄ -P (μ M)	0.127		0.217	
	Salinity (psu)	33.51		33.95	
St. 17 (surface, 0.1 m)	DIN	0.514		0.236	
	PO ₄ -P	0.105		0.064	
	Salinity (psu)	32.83		33.32	

海域汚染の可能性

1. 重金属 マクロベントスの汚染指標分布などから釜石湾内の海底攪乱が示唆されている¹²⁾が、水質汚濁に係る環境基準値に照らした場合、重金属濃度については少なくとも震災1年以降は津波による大きな影響がないことが示唆された。釜石湾内の震災前の重金属濃度に関する既存データは十分に存在していないため、栄養塩のような震災前後の比較は難しい。その一方で震災後の変化については、例えば気仙沼湾・舞根湾において行われている調査⁴⁾で、本研究と同様に重金属評価を行っている。その結果、2011年7-8月頃までは環境基準値以下の濃度であっても重金属濃度が減少する傾向が見られている。しかし釜石湾の調査ではそのような傾向はみられなかった。これは釜石湾の重金属汚染が小さい可能性も考えられるが、それと共に今回のデータが震災1年を経過した時点からのものであることに起因すると予想される。いずれにしても、重金属の水産生物への長期的な影響は考えにくい結果が得られた。

但し、今回の調査結果は環境基準に照らして検討したものであり、安全性に関する評価を行うためには更なる調査や東北以外の海域との比較など詳細な検討が重要と考えられる。震災前では大槌湾・山田湾・大船渡湾と大阪湾・大阪港の底質中の重金属濃度を比較した事例があ

り、岩手県の3つの湾ではHg, Cd, Pb, Ni, Mn, Crなどの環境汚染上の問題となる元素の濃度が大阪湾に比べるとかなり低い¹⁶⁾とされている。震災後3年が経過した段階では重金属は底質に堆積している可能性があり、本調査に加え底質調査が重要である。今後は他の海域との比較として底質中の重金属濃度のモニタリングが必要と考えられる。

2. 放射性物質 ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs とともに釜石湾底質より検出がなされたが、放射性セシウムの起源としては、今回の原子力発電所の事故に起因するもの以外に、過去の海外諸国での核実験の影響によるもの¹⁵⁾などが可能性として考えられる。しかし、¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs の半減期はそれぞれ2.06年と30.1年であることから、起源については、震災前後の放射性セシウム濃度の差とともに¹³⁴Cs 検出の有無によって判断可能である。核実験などの影響であれば半減期を考えると¹³⁴Cs が検出されないためである。

まず震災前との放射性セシウム濃度の差に関しては、釜石湾のデータは存在しないが、Table 2 をみると、今回検出された濃度レベルは、東京湾や仙台湾と比較して特別に高いわけではないことがわかる。また宮城県塩竈湾と女川湾のデータ(1971, 1972, 1974年)(原子力規制庁, 日本分析センター http://www.kankyo-hoshano.go.jp/kl_db/servlet/com_s_index?tid=1, 日本の環境放射能と放射線, 2014年4月3日)からも比較可能である。それによると、最も高い¹³⁷Cs濃度は9.25 Bq/kg(塩竈湾, 1974年), 2.183 Bq/kg(女川湾, 1974年)となっている。またTable 2にあるように釜石湾内のSt. 2, St. 4では、2012年5月に24.0 Bq/kg, 30.0 Bq/kgの値を示しており、震災前の塩竈湾や女川湾よりも高い値を示している。それに加えて、半減期の短い¹³⁴Csも合わせて検出されていることから、福島第一原子力発電所由来の放射性物質が釜石湾にも存在することが示唆された。

一方で、濃度の大きさについては最も高いSt. Cにおいて¹³⁷Csが約60 Bq/kgであり、一般食品の基準値(http://www.mhlw.go.jp/shinsai_jouhou/shokuhin.html, 厚生労働省, 2014年4月3日)よりも低い。またSt. Cは漁港内の海水の出入りが少ない場所(海水が集積する場所)にあることから、放射性物質の集積も起こりやすいと考えられる。実際にSt. C以外の場所の濃度は、経時変化(Fig. 5)をみてもそれよりも低く(50 Bq/kg以下)になっている。更にTable 2に示した東京湾の濃度をもとに考察すると、震災後の東京湾の放射性セシウム濃度は、2011年8月は¹³⁴Csが14 Bq/kg-乾土, ¹³⁷Csが20 Bq/kg-乾土であるのに対し、2012年7月はそれぞれ40 Bq/kg-乾土, 66 Bq/kg 乾土であり、2011年から2012年にかけて増加したことが確認され

ている¹⁶⁾。また東京湾の別の地点(花見川河口付近の窪地)においても, 2010年7月から2013年2月まで半年ごとに放射性セシウムをモニタリングした報告¹⁷⁾があるが, 2012年2月に最大濃度を示し, ^{134}Cs が約 17–20 Bq/kg, ^{137}Cs が約 26–28 Bq/kg となっている。これらの結果より釜石湾の震災後の放射性セシウム濃度は東京湾とほぼ同程度であると言える。今回の調査期間においては釜石湾内の放射性物質の堆積量は他の海域と比べて少なくとも同程度であり, その堆積量も減少あるいは少なくとも増加していない。したがって本調査結果からは, 生態系へ直ちに大きな影響があるとは考えにくいことが示唆された。但し, 釜石湾内においてもホットスポット的に底泥が集積する場所がある可能性もあり, 水産物の場合は生体濃縮の可能性も考えられるため, 今後も水産物も含めた放射性物質の推移をモニタリングしていく必要があると考えられる。

次に放射性物質の運搬経路について考察する。Table 2 に示した地点は釜石湾の湾奥から湾口に向けて順に並べてあるが, St. C が最も濃度が高く, St. 6 や St. 12 は濃度が低い。特に 2012 年 3 月は湾口ほど濃度が高い傾向がみられていることから, 放射性物質は外洋由来ではなく河川由来であることが考えられる。また Fig. 5 では, St. 1 では 2012 年 9 月に最も高い放射性セシウム濃度となっており, St. C では 2012 年 3 月が最大値でその後減少している様子が示されている。このことから, 底泥の移動もしくは新たな堆積によって底質表層の放射性物質量が変化していることが確認された。これは東京湾での現象¹⁷⁾と同様の傾向性である。2012 年秋以降は濃度が安定していることから, 陸域からの新たな放射性物質の流入量が減少している可能性も示唆されるが, 今後の引き続きのモニタリングにより判断していくことが重要と思われる。いずれにしても, 水産物の安全性を考えるにあたって参考となる有用なデータが得られたと考えられる。

本報の意義と課題 本報では, 岩手県釜石湾において, 震災後の海水中の栄養塩, 重金属濃度, および底質中の放射性物質含有量のモニタリング調査を実施し, (1)生態系の変化, (2)海域環境汚染の2つの観点から, 釜石湾の海域環境変化について評価・検討を行った。本報の特徴は, 水産業の復興に寄与する調査研究を目指した点にある。実際に海水中の重金属濃度および底質中の放射性物質含有量について特に大きな値がなかったことが確認されたことは, 海域環境保全とともに水産物の安全性の観点からも意義ある結果と言える。特に放射性物質については, 水産物の調査(水産庁 Web: <http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>, 2014 年 5 月 14 日)やその汚染状況に関する検討¹⁹⁾など水産物自体の汚染状況調査がある中で, 海域環境の調

査と合わせて実施できたということは, 風評被害対策としても重要と考えられる。栄養塩についても, 岩手県水産技術センター等で行われている水質調査を補完する意味でも, また海藻やホタテといった無給餌養殖に対しても, その動態把握は意義あるものと言える。特に釜石湾では, 湾口防波堤の破壊による水質環境の変化の把握が重要と考えられ, その意味でも今回の栄養塩の動態については重要な結果が得られたと言える。その一方で課題としては, 重金属は底質中のモニタリング, 放射性物質については, 深さ方向の動態などの十分な考察が必要であることが挙げられる。今後はこれらの課題に対して評価・検討を行っていきたいと考えている。

謝 辞

本研究は, 東京大学海洋アライアンス「東北地方太平洋沖地震・津波災害からのレジリアンス向上についての提言に資する調査, ワークショップ等イベントに対する支援」からの援助により行われた。釜石湾での調査にあたっては, 釜石市水産農林課をはじめ現地関係者の方々, (一社)日本プロジェクト産業協議会からの多大なる協力を頂いた。また栄養塩データの解析にあたっては, 岩手県水産技術センターより震災前の観測データの提供を頂いた。ここに感謝の意を表す。

文 献

- 1) 水産庁. 「平成 24 年度 水産白書」東京. 2013.
- 2) 山本光夫, 横山勝英, 吉永郁生. 気仙沼舞根湾における重金属類と流出油の水質・底質への影響. 海洋と生物 2012; **203**: 538–544.
- 3) 西谷 豪, 山本光夫, 夏池真史, 劉 丹, 吉永郁生. 気仙沼舞根湾の植物プランクトンの動態. 海洋と生物 2012; **203**: 545–555.
- 4) 山本光夫, 劉 丹, 長坂翔子, 横山勝英. 気仙沼舞根湾海域における水質の推移. 海洋と生物 2013; **209**: 547–553.
- 5) 鈴木孝男. 東日本大震災による干潟環境の変化と底生動物への影響. 水環境学会誌 2011; **34**(A12): 395–399.
- 6) 玉置 仁, 村岡大祐. 地震とそれにともない発生した津波が藻場・干潟生態系に及ぼした影響. 水環境学会誌 2011; **34**(A12): 400–404.
- 7) 西村 修. 震災が松島湾の水環境に及ぼした影響について. 水環境学会誌 2013; **36**(A2): 49–52.
- 8) 田中 克. 気仙沼舞根湾調査の目的と課題. 海洋と生物 2012; **203**: 515–523.
- 9) Kumamoto Y, Aoyama M, Hamajima Y, Aono T, Kouketsu S, Murata A, Kawano T. Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific. *Sci. Rep.* 2013; **4**: 4276.
- 10) Nagao S, Kanamori M, Ochiai S, Tomihara S, Fukushi K, Yamamoto M. Export of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the Fukushima river systems at heavy rains by Typhoon Roke in September 2011. *Biogeosciences* 2013; **10**: 6215–6223.
- 11) 内記公明, 加賀新之助. 主要湾の津波以降の漁場環境の

- 把握．岩手県水産技術センター年報，平成23年度(2011)．2012; 67-78.
- 12) 内記公明，加賀新之助．主要湾の津波以降の漁場環境の把握．岩手県水産技術センター年報，平成24年度(2012)．2013; 98-101.
- 13) 海上保安庁海洋情報部．放射能調査報告書 平成24年調査結果．東京．2014; <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/OSEN/housha/ho2012.pdf>.
- 14) 高木 稔，加賀新之助．養殖漁場の環境収容力に関する研究．岩手県水産技術センター年報，平成19年度(2007)．2008; 78-81.
- 15) 真田幸尚，佐藤 太，熊田英峰，高田秀重，山本 愛，加藤義久，上野 隆．放射性核種および molecular marker による東京湾の堆積過程の解明．地球化学 1999; **33**(2): 123-138.
- 16) 山本義和，長岡千津子．内湾の重金属類のモニタリング．「三陸の海と生物—フィールドサイエンスの新しい展開」(宮崎信之編)サイエンティスト社，東京．2005; 179-195.
- 17) 原子力規制委員会．東京湾，福島沖及び茨城県沖における放射能調査結果について．海上保安庁．2014.
- 18) 添盛晃久，小豆川勝見，野川宣夫，桧垣正吾，松尾基之．東京湾底質における福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムの濃度変化．分析化学 2013; **62**: 1079-1086.
- 19) 吉川貴志，八木信行，黒倉 壽．福島県産海産物の放射性セシウム濃度による汚染状況の類型化．日本水産学会誌 2014; **80**: 27-33.