特集 大槌湾周辺における東北地方太平洋沖地震後の海洋生態系の変化：東北マリンサイエンス拠点形成事業（プロジェクト）による取組とその成果

東日本大震災から5年間の大槌湾の栄養塩環境

福田 秀樹,^{1*} 永田 俊²

¹東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター, ²東京大学大気海洋研究所海洋化学部門生元素動態分野

Nutrient status of Otsuchi Bay following 5 years after the Great East Japan Earthquake

HIDEKI FUKUDA^{1*} AND TOSHI NAGATA²

¹International Coastal Research Center, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Otsuchi, Iwate 028-1102, ²Department of Chemical Oceanography, Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8564, Japan

1. はじめに

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震に伴う大津波により、太平洋に面した東北4県（青森県、岩手県、宮城県、福島県）および茨城県の沿岸部は甚大な被害を受けた。これらの地域では、1)藻場・干潟を含む海岸線や浅海部の物理的被害のほか、2)陸域からの瓦礫・化学物質の流入、そして3)沿岸部での下水道や処理設備といった都市機能の損壊に伴う陸から海洋への物質輸送プロセスの変化、さらに4)無給餌養殖を始めとする漁業活動の壊滅的な被害といった、沿岸域での物質循環過程を取り巻く諸要因に対する変化が生じたことから、沿岸生態系の生産力を支えてきた栄養塩循環に対する影響が懸念された（東日本大震災による海洋生態系影響の実態把握と今後の対応策の検討（日本海洋学会 提言）：http://kaiyo-gakkai.jp/jos/archives/geje2011_artcl/1589, 2017年3月31日）。このような状況に対し、震災後には三陸沿岸の各地で栄養塩環境のモニタリングが実施されてきた（本州北部より順に大槌湾,^{1,2)} 釜石湾,³⁾ 大船渡湾,⁴⁾ 舞根湾,⁵⁾ 長面浦,⁶⁾ 仙台湾⁷⁾）。本稿では、「東北マリンサイエンス拠点形成事業」東京大学大気海洋研究所グループ（プロジェクト）を中心に実施されている、岩手県大槌湾の栄養塩類に対するモニタリング調査より、震災から5年間の結果で明らかになったことを紹介する。

岩手県大槌湾は三陸地方のリアス海岸の中ほどに位置し、幅2-4 km、奥行き約7 kmの大きさを持ち、三陸地方の多くの湾と同様に閉鎖性海域として指定されているが、震災時には最大波高15.1 mの津波の襲来に見舞われ、隣接する大槌町だけでも約1600名もの人命が失われた。¹⁾ またその浸水域は約6.68 km²におよび、5,600棟もの建物が全壊したほか、上下水道や下水処理

場など、陸域からの栄養塩類の流入負荷に影響を与える設備も損壊した。¹⁾ 大津波により岩手県各地の内湾域の栄養塩類の動態が受けた影響の類型化は進んでいないが、堆積物を対象とした研究事例では、津波に伴う堆積物の移動、ならびにその化学組成と底生生物相の変化について、内湾域の閉鎖性に大きな影響を与える湾口防波堤の有無でおよそ2つのグループに分けられている。湾口防波堤が無いグループの一つである大槌湾では、湾内に堆積していた堆積物の多くが湾外へと流出したほか、その化学組成が変化するとされている。⁸⁻¹⁰⁾ これらの湾の構造的な特性および湾周辺の被害状況に加え、震災前の栄養塩類に関する文献が比較的豊富であることから、¹⁾ 被害を受けた三陸沿岸部の内湾環境の典型的な例として大槌湾を調査の対象とした。

2. 調査および解析の概要

試水は大槌湾の湾口から湾奥の鵜住居川河口までを結んだ線上に設定した5つの観測点にて採取した（図1）。観測は震災から約2ヶ月に当たる2011年5月27日から約2ヶ月に一度の頻度で行っており、本稿を執筆している2017年3月の段階でも調査を継続しているが、本稿ではFukuda *et al.*¹⁾ および福田ら²⁾ にて既に報告した2016年3月7日まで結果の概要を紹介する。試水は4-48 mの間隔であらかじめ設定した水深より採取しており、本稿では割愛するが、調査では同時にセンサーを用いた水温、塩分の鉛直プロファイルのほか、セッキ板を用いて透明度を測定している。硝酸塩、亜硝酸塩、アンモニウム塩、リン酸塩およびケイ酸の各種栄養塩類の濃度は、連続流れ式自動分析機を用いた比色法で測定した。¹⁾ 試料の分析に際し、ろ過による粒子の除去を行わなかったが、震災直後には海水中の濁度が高かった時

図1 大槌湾における調査地点
破線は等深線 (m)。

期もあり、硝酸塩と亜硝酸塩アンモニウム塩の総和については、全溶存態無機窒素ではなく無機態全窒素（以下TIN）とした。¹⁾

震災以前の栄養塩類のデータを参照した文献、ならびに本研究の分析法の差異や、季節的な偏りの違いについては Fukuda *et al.*¹⁾を参照していただきたい。大槌湾では季節的に異なる起源をもつ水塊の流入が報告されており、成層構造が発達する5月～9月には湾内の下部に津軽暖水が流入し、混合層深度が増加する10月～1月には湾内の水柱のほぼ全てが津軽暖水により占められるが、2月～4月には湾内は主として親潮水により占められるとされている。^{1,11)} 震災前後の各年代で栄養塩類濃度の比較を行う際には、水塊の特徴に合わせた3つの期間（成層期：5月～9月、混合期：10月～1月、親潮流入期：2月～4月）毎に行った。

3. 震災から5年目までの間に見られた特徴

以下に、震災以降に見られた栄養塩類の特徴的な分布を時系列で紹介する。震災1年目の2011年成層期に、亜硝酸塩およびケイ酸の顕著な蓄積（それぞれ $1.33 \mu\text{M}$, $32.5 \mu\text{M}$ 以下）がみられ、震災前後の他の年代に対して有意に高かった（図2）。湾の中央部付近（測点2）におけるこの時期の亜硝酸塩の濃度ピークは2011年5月の海底付近に見られたが、水柱の上部でも亜硝酸塩は硝酸塩とのモル比で4倍以上存在しており、水柱内で2倍を超える状態が2011年9月まで見られた。¹⁾ 一方、ケイ酸の濃度のピークは9月に表層部で見られたものの、水柱の中部にも極大が見られる特異な鉛直プロファイルを示した。¹⁾ 亜硝酸塩の蓄積の原因は明らかではないが、この期間には損壊した大槌町内の下水処理場から一次処理水を排出していたほか、陸上では水産加工場の冷凍設備より流失した魚介類の腐敗が進行しており、湾内に一時的に嫌気的な環境からの負荷がもたらされた可能性が考えられる。この2011年5～9月期間では水柱

内の濁度も翌年の同時期に比べて高くなっており、陸域からの継続的な懸濁物の流入があった可能性が考えられる。¹⁾ ケイ酸の蓄積もこれらの懸濁物の流入と関連があるのかもしれない。

続く2011年の混合期には顕著なリン酸塩の蓄積（ $1.06 \mu\text{M}$ 以下）が見られ（図2）、同期間のTINとリン酸塩のモル比（以下、TIN/P比）の顕著な低下（平均6）が見られた（図3）。このリン酸塩の蓄積は混合期に入る前の7月の段階で測点2の海底付近より見られており、混合期には湾内全域の水柱に広がっていった。¹⁾ 高濃度のリン酸塩を含み、かつTIN/P比が低い海水が海底付近から広がっていたことから、これらが嫌気的な堆積物からのリン酸塩の溶出、また脱窒過程による無機態窒素の除去によりもたらされたものである可能性が考えられる。¹⁾

震災の2年目以降、5年目までの間に、震災前と比べて濃度の平均値に統計的に有意な差が出た事例としては、2015年3月の親潮流入期のケイ酸、リン酸塩、TINが挙げられる（図3）。大槌湾ではこの時期に季節風により駆動される湧昇により、湾外の有効層以深から低温で栄養塩類に富む水塊が輸送される現象が報告されていることから、^{12,13)} 震災前のデータのうち、2015年3月の水温と同程度の水温帯での報告例と比較したところ、この現象が震災後に特異な事例ではないことが明らかとなった。²⁾ またTIN/P比は、同時期に大槌湾外の水深300mの地点で行われた調査で得られた値との間に有意な差は見られず、湾内で見られた高濃度の栄養塩類が湾外の低層からもたらされたと考えて矛盾がない結果となった。²⁾ これらのことから、この2015年3月の事例については震災と関連付けるものではないと考えている。

震災から2年目の混合期から親潮流入期にかけての時期（2012年10月から2013年3月）、また3年目の混合期（2013年11月から2014年1月）には、TIN/P比がレッドフィールド比（TIN/P比=16）を超える事例が出現し、年間の平均TIN/P比が震災前よりも上昇した（図3）。震災から4年目（2014年11月から2015年1月）では震災前と有意な差が見られなくなったが、5年目（2015年11月から2016年1月）には再度有意に高くなっていた。²⁾ TIN/P比が高くなった理由として、1) 湾内に流入する有機態・無機態物質中のTIN/P比の変化、2) 堆積物中の脱窒量の減少、3) 湾内水柱での窒素固定量の増加、4) 湾内の生物群集の体組成または代謝特性における化学量論的な変化、などが考えられる。¹⁾ 比の上昇がみられたのは、各年代とも、水柱内の混合が盛んになり、海底付近の水塊が水柱全体に広がる混合期から親潮流入期であったことから、堆積物中での代謝過程が鍵となっているのかもしれない。大槌湾では、2012年9月の段階で、堆積物中の酸揮発性硫化物の量

図2 大槌湾の各年代の成層期(5~10月), 混合期(11~1月)および親潮流入期(2~4月)における(a)亜硝酸塩, (b)ケイ酸, (c)リン酸塩および(d)全無機態窒素の各濃度の箱ひげ図(福田ら²⁾のFigure 4を改変)

各年代は津波前のB1(1973~1977)およびB2(1996~2008), 津波後のA1(2011年5月~2012年3月), A2(2012年5月~2013年3月), A3(2013年5月~2014年3月), A4(2014年5月~2015年3月)およびA5(2015年5月~2016年3月)となっている。津波前のデータの引用元はFukuda *et al.*¹⁾を参照。箱の上端, 下端, 内部の中央線およびエラーバーの上端, 下端はそれぞれ25%点, 75%点, 中央値, 10%点, 90%点を示しており, ●は外れ値を示している。各箱の下部の異なるアルファベットは平均値に有意差があることを示し(Kruskal-Wallisの順位に基づく分散分析およびDunn法, $p < 0.05$), 数字は試料数を示している。

が震災前よりも減少したことが報告されており,¹⁰⁾ さらには漁業活動の復旧に伴って, 養殖海域での底質にも変化が報告されていることから,¹⁴⁾ 堆積物中の窒素の代謝過程に影響を与える溶存酸素の分布が震災前後で変化した可能性が考えられる。また, 大槌湾の海岸線付近や陸上で行われている大規模な土木工事や, 無給餌養殖をはじめとする湾内での漁業活動の再開などが, 湾内への窒素・リンの負荷量ならびにその代謝過程に与えた影響についても, さらなる検討が必要である。

4. おわりに

震災後, 各地で栄養塩環境のモニタリングが実施されているが, 震災前後で統計的に有意な変化が報告されているのは大槌湾^{1,2)}および大船渡湾⁴⁾のみである。大船渡湾では震災後に生じた養殖筏の減少に伴う湾内生態系の変化や湾口防波堤の損壊に伴う水通しの変化により, アンモニウム塩およびリン酸塩の濃度が減少し, クロロフィル *a* 濃度や細菌数といった栄養塩類を利用する生物群集にも変化が報告されている。⁴⁾ 一方, 大槌湾では震災前後でクロロフィル *a* 濃度やプランクトン群集の組成に顕著な変化は見られていないが(本特集の西部ら),

このことは内湾域の生産力を規定する主要な要因の一つであるTINに顕著な変化が見られていないことと関係するのかもしれない(図2)。大船渡湾と同様に湾口防波堤が損壊した釜石湾においても, 震災前後で湾内外での海水交換の程度が変わることで栄養塩類の季節変動が変化した可能性が指摘されている。³⁾ 一方で, 湾口防波堤が無い舞根湾, 長面浦, 仙台湾では明確な震災前後の変化は報告されていない。⁵⁻⁷⁾ 栄養塩環境に対する地震と津波の影響の規模や態様は湾ごとに大きく異なっており,¹⁻⁷⁾ その類型化は困難であるが, 湾口防波堤の有無により類型化がなされた堆積物に対する影響⁸⁻¹⁰⁾と同様に, 湾口防波堤の損壊による湾内の循環の変化が類型化に向けた一つの鍵となるかもしれない。今後も様々な研究分野からの報告が蓄積することで, 震災が沿岸生態系に与えた影響の実像が浮かび上がってくることを期待したい。

文 献

- 1) Fukuda H, Katayama R, Yang Y-Y, Takasu H, Nishibe Y, Tsuda A, Nagata T. Nutrient status of Otsuchi Bay (northeastern Japan) following the 2011 off the Pacific

図3 各年代における全無機態窒素とリン酸塩の関係 (福田ら²⁾の Figure 6 を改変)

○: 成層期, ▽: 混合期, □: 親潮流入期。実線は各年代における Reduced Major Axis 法による回帰直線を, 破線は Redfield 比を示している。

- coast of Tohoku Earthquake. *J. Oceanogr.* 2016; **72**: 39–52.
- 福田秀樹, 楊燕輝, 高巢裕之, 西部裕一郎, 立花愛子, 津田 敦, 永田 俊. 2011 年東北地方太平洋沖地震以降 5 年間の三陸沿岸大槌湾における栄養塩環境の変化. 沿岸海洋研究 2017; **54**: 105–116.
 - 山本光夫, 加藤孝義, 多田 茂, 北澤大輔, 藤野正俊, 小豆川勝見, 松尾基之, 田中 潔, 道田 豊. 東日本大震災後の釜石湾における海域環境変化. 日本水産学会誌 2015; **81**: 243–255.
 - Yamada Y, Kaga S, Kaga Y, Naiki K, Watanabe S. Changes of seawater quality in Ofunato Bay, Iwate, after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *J. Oceanogr.* 2017; **73**: 11–24.
 - 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 (特集津波の海に生きる未来創生: 気仙沼舞根湾調査). 海洋と生物 2012; **34**: 545–555.
 - 玖津見将史, 寺田一美, 内田 理, 福江潔也, 長 幸平. 宮城県石巻市長面浦における東日本大震災後の水質特性. 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 2013; **69**: 1096–1100.
 - Taniuchi Y, Watanabe T, Kakehi S, Sakami T, Kuwata A. Seasonal dynamics of the phytoplankton community in Sendai Bay, northern Japan. *J. Oceanogr.* 2017; **73**: 1–9.
 - 西 敬浩, 八木 宏, 神山孝史, 杉松宏一, 林 健太郎, 中山哲蔵. 東北地方太平洋沖地震津波による三陸内湾域の流動構造と底質環境変化の把握. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2013; **69**: 286–290.
 - 神山孝史, 内記公明, 渡邊志穂. 東日本大震災以後の岩手県内湾域における底質環境と底生生物の変化. 月間海洋, 2014; **46**: 79–85.
 - 内記公明, 山田美和, 加賀新之助, 渡邊志穂, 神山孝史, 加戸隆介, 緒方武比古, 難波信由, 林崎健一, 山田雄一郎, 山下哲郎. 2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波による岩手県沿岸内湾域の底質変化. 日本水産学会誌 2015; **81**: 447–455.
 - Ishizu M, Itoh S, Tanaka K, Komatsu K. Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan. *J. Oceanogr.* 2017; **73**: 115–131.
 - Furuya K, Takahashi K, Iizumi H. Wind-dependent formation of phytoplankton spring bloom in Otsuchi Bay, a Ria in Sanriku, Japan. *J. Oceanogr.* 1993; **49**: 459–475.
 - Otobe H, Onishi H, Inada M, Michida Y, Terazaki M. Estimation of water circulation in Otsuchi Bay, Japan inferred from ADCP observation. *Coast. Mar. Sci.* 2009; **33**: 78–86.
 - 安達貴浩, 小橋乃子, 坂口幸太. 大槌湾の養殖海域における底質環境特性. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 2015; **71**: 1393–1398.