東北沖津波によるかく乱を受けた干潟の 回復過程に及ぼす防潮堤工事の影響

鈴木 まゆみ¹⁾⁺²⁾ 小瀬 知洋^{3),†} 大野 正貴³⁾
玉置 仁⁴⁾ 川田 邦明³⁾

Influence of Embankment Construction on Restoration Process of Tidal Flat Disturbed by Tohoku-oki Tsunami of 2011

Mayumi SUZUKI¹⁾⁺²⁾, Tomohiro KOSE^{3),†}, Masaki OHNO³⁾, Hitoshi TAMAKI⁴⁾ and Kuniaki KAWATA³⁾

¹⁾ Former Affiliation: Graduate School of Applied Life Sciences, Niigata University of Pharmacy and Applied Life Sciences, Higashijima 265-1, Akiha-ku, Niigata, Niigata 956-8603, Japan

²⁾ Present Affiliation: Institute of Environmental Ecology, IDEA Consultants Inc., Riemon 1334-5, Yaidzu, Shizuoka 421-0212, Japan

³⁾ Faculty of Applied Life Sciences, Niigata University of Pharmacy and Applied Life Sciences, Higashijima 265-1, Akiha-ku, Niigata, Niigata 956-8603, Japan

⁴⁾ Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Minamisakai Shin-mito 1, Ishinomaki, Miyagi 986-8580, Japan

Abstract

The tidal flat in Hatsutsu-ura bay located in Oku-Matsushima, Miyagi prefecture, was disturbed by the Tohoku-oki tsunami generated by the Great East Japan Earthquake of 2011. The population of benthic organisms in the tidal flat, including clams, was greatly reduced by the disturbance, and subsequently, the sediment environment did not recover. In this study, to clarify the influence of embankment construction in the coastal area on the changes in the sediment environment during the recovery process after the earthquake, cluster analysis and principal component analysis using the metal composition of tidal sediment were conducted. The influence of the input from the drainage outlet of the embankment construction site was observed in the inner part of the bay, and another influx from outside of the bay was also observed at the entrance of the bay. In addition, we investigated the spatial distribution of these influxes in tidal sediment. The influx from the drainage outlet mainly affected the inner part of the bay, whereas the influx from outside of the bay mainly affected the bay entrance. In the central part of the bay, a relatively small effect of these influxes compared with other parts was observed.

Keywords: Great East Japan Earthquake; Tidal flat; Sediment; Influx source

1. はじめに

2011年3月11日に東北地方太平洋沖で発生したマグニチュード9.0の強い地震により¹⁾, 津波が発生した。この東北太平洋沖津波は、東北及び関東地方の太平洋沿岸を1,300 km以上にわたり浸水させ、干潟をはじめとする沿岸環境に大きなかく乱を及ぼした。Kanayaら²⁾は、鴨川の潮干帯において東北太平洋沖津波によって生物相がかく乱され、5ヵ月後に*Hediste diadroma*や*Pseudopolydora*などの多毛類が増加したと報告している。また港湾工事による環境かく乱で湾内の泥化が進み、港湾への河川の流路が変形したという例もある³⁾。干潟は潮汐の干満によって干出と水没を繰り返す潮間帯に位置する砂泥域の総称で⁴⁾, ゴカイなどの多毛類, エビやカニなどの節足

動物や貝類など様々な底棲生物の生息場所となっている。これらの底棲生物の種組成や生育は底質環境に左右されるが、その底質環境を形成する重要な物理的要素として粒度組成が挙げられる⁵⁻⁷⁾。干潟において底質中のシルトおよび粘土粒子は海水の浸透を抑制し、毛細管現象によって内部水位を保持する作用があり⁸⁾, 海水を媒介した干潟底質内への酸素や栄養塩の供給を制限することが懸念される。なかでも、0.075 mm未満の粒径のシルト・粘土は微生物が付着しやすく、有機物質を吸着するため生物相を豊かにする作用をもつ⁹⁾。そのため、珪藻類や二枚貝類の生育には粒度組成が大きくかわっており、シルト・粘土が増加すると二枚貝は減少する¹⁰⁾が珪藻類は増加する¹¹⁾ことが知られている。干潟や砂浜は工事などの急激な環境かく乱によって生じた底質環境の変化に

1) (元)新潟薬科大学大学院応用生命科学研究科 〒956-8603 新潟市秋葉区東島 265-1

2) (現) いであ株式会社環境創造研究所 〒421-0212 静岡県焼津市利右衛門 1334-5

3) 新潟薬科大学応用生命科学部 〒956-8603 新潟市秋葉区東島 265-1

4) 石巻専修大学理工学部 〒986-8580 宮城県石巻市南境新水戸 1

† 連絡先: tkose@nupals.ac.jp

対しては復元力を有しており、数年であるべき姿に回復する^{12, 13)}。曹らは干潟底質の勾配とシルト・粘土含有量が干潟における海水流動によって復元するため、人為的に創出された干潟も海水流動環境を調整する前提などの敷設を伴わなければ、自然の状態に復元すると報告している¹⁴⁾。したがって、護岸工事などによる流動環境の変化を伴う環境かく乱は、この復元力を左右し、底質環境の変化を不可逆にし、底棲生物相に長期的な影響を及ぼすことが懸念される。

東北地方沿岸域では、東北地方太平洋沖に伴って大規模な地盤沈下が生じ、最大で84 cm程度沈下したと報告されている¹⁵⁾。また地震後の時間経過の中で、前述の沈下後に最大で43 cm回復していることも報告されている¹⁶⁾。地盤沈下は、沿岸域においては水深の変化につながり、水深の変化は浸水時間や水中光量の制限などを引き起こすため生態系に重大な影響を及ぼすことが予想される。宮城県奥松島に位置する波津々浦湾干潟は、津波によって底質の削り取りをはじめとする強いかく乱を受けた。この干潟では津波によるかく乱を受けた直後、シルト・粘土が減少し、地盤高が最大で80 cm程度低下した。この干潟では、震災後の回復過程においてシルト・粘土が被災前の水準を超える水準まで増加するなどの底質環境の変化が生じ、アサリの個体密度の回復していないことが報告されている¹⁷⁾。この干潟の位置する湾の海岸線では震災で破損した防潮堤および冠水した農地の修復工事が行われており、工事に伴う排水が陸域から湾内に流入しており、それに伴い砂泥の流入も確認されているが、湾内の干潟における工事に伴う排水による底質の粒度組成の変化に対する因果関係は明らかではない。

クラスター分析（以下、CAとする）はこれまでに多くの研究で汚染源の推定に使用されてきた統計的手法で^{18, 19)}、自然科学や社会科学などさまざまな分野の高次元データから隠れた構造やパターンを抽出、比較する際に一般的に使用されてきた多変量解析手法である。Suzukiらは東日本大震災における津波堆積物の起源を、その金属組成と物理化学特性に基づくCAによって明ら

かにした²⁰⁾。したがって、排水に伴って流入する砂泥と干潟底質の金属組成が異なる指紋を有していれば、これをCAによって比較することで評価し、重金属類を防潮堤工事の影響の指標としようと考えられる。

主成分分析（以下、PCAとする）は、多次元データから、連動して変動する主要なベクトルを抽出し、低次元化された主要な成分を抽出する統計手法であり、金属組成などの複雑な変動から特定の負荷源や汚染源の寄与を示す主成分を抽出しうる可能性を有する^{21, 22)}。したがって、金属組成と物理化学特性に基づくPCAによって、防潮堤工事の影響の指標となる金属を抽出しうることが期待できる。

以上のことから本研究では、東日本大震災によってかく乱を受けた宮城県奥松島に位置する波津々浦湾干潟の回復過程における底質環境の変化に対する沿岸工事の影響を明らかにするため以下の検討を行った。

- (1) 干潟底質および排水口からの流入物の金属組成に基づくCAおよびPCAによって、干潟底質環境の変化の原因を明らかにする。
- (2) 上記の目的における諸原因の干潟底質に対する影響の空間的分布を明らかにする。

2. 方法

2.1 試料採取

宮城県奥松島の波津々浦湾干潟内における試料の採取は2015年8月に実施した。同湾では2013年から2015年初頭にかけて、湾奥に防潮堤建設場所の埋立て工事における排水口(D.1)が設置され、排水が行われていた(Fig. S1 (a))。また湾中央南岸には、2015年から湾南側に位置する津波と地盤沈下によって冠水した農地の復旧工事現場における排水口(D.2)が設置され、工事現場からの排水が放水されている(Fig. S2 (a))。Fig. 1に四角のシンボルで示す26地点において干潟底質の採取を行った。また三角のシンボルで示す排水口付近の3地点において、負荷源に相当する排水口からの流入物を採取した。湾奥の排水口D.1直下の干潟には、砂泥状の流入物が山状に

Fig. 1 Location of sampling area and individual sampling points. types of sample (□: sediment sample, △: drainage inflow sample), sampling methods (surface sampling: □, core sampling ■).

堆積しており (Fig. S1 (b)), この堆積物を排水口 D.1 からの流入物の代表として採取した。湾央南岸に位置する排水口は岩礁域に位置するが、岩礁の表面において排水口近傍に、周辺より顕著な砂泥の堆積が確認されたため、この砂泥を同排水口からの流入物の代表として採取した (D.2)。また同排水口に接続する陸上の排水溝内に堆積した砂泥も合わせて採取した (D.2D)。

底質試料は直径 10 cm の塩化ビニル製コアを用いて表層から 5 cm 程度を採取した。但し湾奥及び湾口南岸付近に底質の堆積と性状変化が著しい場所が確認されたため、この場所の断面に相当する湾奥の地点 1, 3, 5, 7 および 8 と湾口の地点 16, 18, 19, 20, 21, 25 および 26 においては、流入物の堆積過程を評価するために深度 30 cm までコアリングを行い、5 cm ごとに成層分割して底質を採取した。地点 20 および 25 においては、礫分が多いため深度 20 cm および 15 cm までしかコアリング不可能であったため、この深度までの採取となった。成層採取した底質のうち、直近の堆積物の性状を反映することが期待できる 0~5 cm の表層部試料 (試料名を地点名の後に添字 S で表記) および最深部 5 cm の試料 (同じく添字 D で表記) を評価対象試料とした。採取したすべての試料は、後述する手順でそれぞれの分析に供するまで -18 °C で保存した。

2.2 分析方法

採取した全ての試料は 2.0 mm 目開きのナイロン製篩を用いて小石や大きな異物を除去した後に均質化を行った。均質化した試料から 10 g 程度をとりわけ、Lee ら⁵⁾の手順に基づく以下の手順に従って強熱減量 (I.L.) を測定した。I.L. は、試料を 105 °C で乾燥し乾燥重量を測定した後、600 °C で 2 時間加熱して再度重量を測定して乾燥重量に対する割合 (%) として算出した。均質化した試料から別途 5 g 程度をとりわけ、試料中の金属含有量を測定に供した。試料に 10 mL の HNO₃ (69%~71%, Ultrapur-100; 関東化学株式会社, 東京, 日本) と 20 mL の HCl (35%~37%, Ultrapur-100; 関東化学株式会社, 東京, 日本) を加えて王水分解を行った。分解後、試料に再び HNO₃ 20 mL を加えて硝酸分解し、濾紙 (No. 5B, アドバンテック, 東京, 日本) で濾過した。次に、得られた溶液は測定対象元素濃度に応じて適宜希釈し、In および Bi を内部標準として添加し、誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS) (SPQ 9000; SII ナノテクノロジー, 千葉, 日本) を用いて分析した。ICP-MS 条件は、高周波電力 1.1 kW, プラズマガス流量 1.5 L 分⁻¹, ネブライザーガス流量 0.6 L 分⁻¹ であり、サンプリングコーンの深さは 3.5 mm, パルスモードで測定した。測定対象元素の定量は、Al が 27, V が 51, Cr が 52, Mn が 55, Fe が 56, Co が 59, Ni が 60, Cu が 63, Zn が 64, Mo が 98, Cd が 114, Sb が 121, Ba が 138, Pb は 208 の質量電荷比 (m/z) を用いて、In および Bi (m/z は 115 および 209) を内標準物質として行った。この方法における回収率および精度を評価するために、認定基準物質 (CRM No. 31; 国立環境研究所, つくば) を使用して繰り返し回数 5 回で回収試験を行った。基準物質からの回収率および相対標準偏差は、それぞれ 78% (Cr)~96% (Pb) および 0.2% (Cu)~10% (Fe) の範囲であった。最小測定限界は、Zn と Mn が 0.3 mg kg⁻¹, Fe が 5 mg kg⁻¹, Cd

が 0.1 mg kg⁻¹, 他の金属が 0.2 mg kg⁻¹ であった。

2.3 統計分析

CA および PCA には解析ソフトウェアとして Statistica Standard 06J (Statsoft Inc., Tokyo, Japan) を使用した。CA は、試料を類似の属性を共有するグループに分類する多変量解析手法であり、底質を起源の異なるグループに分類するために用いた。クラスターの作成は、Table S1 に示した干潟底質および排水口からの流入物試料中の 14 種の金属 (Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, Ba, Pb) 含有量および I.L. を特性値として、平均値を 0, 標準偏差を 1 として標準化を行い、ユークリッド距離に基づいてウォード法によって行った。PCA は CA に用いた特性値のうち、ピアソンの相関係数が相互に 0.8 以上であった V, Cr, Co, Ba については V のみを、Mo, Ni については Ni のみを特性値として用いたため、10 元素を特性値として、(Al, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Sb, Pb), これらの平均値を 0, 標準偏差を 1 として標準化を行った値を用いた。

3. 結果および考察

3.1 底質の特性

Table S1 に採取した全試料の金属含有量および I.L. を示す。排水口からの流入物試料 D.1 と D.2 および D.2D を比較すると 0.80 倍 (Mo) から 4.3 倍 (Ba) の差があるなど、その金属含有量には差がみられ、その傾向は元素ごとに大きく異なっている。Suzuki ら (2017) は鉍物質を含む津波堆積物の金属組成を、異なる金属組成を有する陸上土壌および海底質との類似性を CA によって検討し、津波堆積物の起源を明らかにした²⁰⁾。したがって、各排水口試料を把握し、クラスター解析を行うことで、空間的に分布している各サンプリング地点における、それぞれの排水口による影響範囲を解析することが可能となる。そこで、Table S1 に示した特性値に基づいて排水口試料と干潟底質の金属組成の類似性を CA によって検討した。

Table 1 に金属組成および強熱減量間のピアソンの相関係数を示す。V, Cr, Co, Ba の 4 元素は相互に $R > 0.8$ の相関を有し、かつこれらのうち V, Cr, Ba は親石元素である²³⁾。Co は親鉄元素である²³⁾ が、地殻含有量 25 ppm と親鉄元素の中では地殻に豊富な元素である²⁴⁾。このため、これらの 4 元素は調査対象地域において共通する地殻性の起源を有すると考えられ、PCA において 4 元素を代表する元素として V のみを用いた。また Ni と Mo は $R = 0.86$ の相関関係を有し、かつこれらは親鉄元素である²³⁾。このため、これら 2 元素は共通する起源を有すると考えられ、PCA において Ni のみを用いた。

3.2 クラスター分析に基づく底質の起源解析

Fig. 2 に Table S1 に示した 26 地点で採取した 38 個の底質試料および 3 の排水口試料の各特性値に基づく CA から得られた樹形図を示した。試料はユークリッド距離 30 において C I と C II に分類された。C I は距離 10 において湾央に分布する 4 試料からなる C Ia と主に湾口の試料からなる C Ib に分類された。C Ib は距離 7 においてさらに C Ib1 と C Ib2 に分類された。C II は距離 14 において、南岸の排水口からの流入物 D.2 が属する C IIa と湾奥の排水口からの流入物 D.1 が属する C IIb とに分

Table 1 Pearson correlation coefficient between respective metal concentrations and I.L.

n=41

	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	I.L.
Al	-0.21	-0.08	-0.29	-0.98	-0.19	0.11	0.07	-0.08	0.04	-0.29	0.12	-0.07	-0.07	0.12
V		0.80	0.77	0.18	0.95	0.39	0.27	0.47	0.49	0.20	0.18	0.80	0.73	-0.13
Cr			0.55	0.06	0.88	0.46	0.54	0.37	0.56	0.27	0.29	0.82	0.88	0.16
Mn				0.25	0.78	0.19	0.08	0.27	0.25	0.36	0.01	0.62	0.45	-0.49
Fe					0.16	-0.12	-0.08	0.07	-0.06	0.28	-0.12	0.04	0.05	-0.11
Co						0.54	0.32	0.39	0.60	0.31	0.22	0.81	0.86	-0.06
Ni							-0.01	0.03	0.86	0.41	0.15	0.30	0.70	0.28
Cu								0.31	0.13	-0.01	0.11	0.47	0.42	0.23
Zn									0.23	0.15	0.23	0.57	0.22	0.06
Mo										0.40	0.17	0.43	0.74	0.23
Cd											-0.09	0.03	0.24	-0.09
Sb												0.31	0.24	0.09
Ba													0.69	-0.04
Pb														0.28
I.L.														

*: Bold coefficient denotes proportional correlation ($R > 0.80$). **Fig. 2** Dendrogram showing similarities of tidal flat sediments and drainage inflows in Hatsutsu-ura bay ($n=41$).

類された。しかしながら、C IIaに属した排水口からの流入物 D.2 および、この排水口に接続する水路の堆積物 D.2D、25D および 13 の底質 2 試料は距離 11 においてさらに分離しており、25D および 13 への排水口 D.2 の流入物の影響は小さいと推察される。C IIb に属した試料は距離 9 においてさらに C IIb 1 と C IIb 2 に分類された。

C I と C II の間では、Al, V, Cr, Fe, Co, Cu, Zn, Sb, Ba, Pb の濃度および I.L. において有意な差 ($p < 0.05$) が見られ、これらが全て C II において高い傾向を示した。したがって、C I と C II は、主として試料中の金属含有量と I.L. の差によって分離されたと考えられた。C I に属する試料は 3D, 7D, 9 の 3 試料を除いて全て湾奥から湾口に分布した。一方、主として湾奥の地点 (1S, 1D, 2, 3S, 4, 5S, 5D, 6, 7S, 8S, 8D) と、一部湾口の地点 (17, 24, 25S, 25D, 26D) が C II に属した。湾奥は試料採取時における目視観察において最も泥化が顕著であった場所であり、湾口においても一部泥化が確認されている。この傾

Fig. 3 Schematics showing classification of individual sediment and drainage inflow samples by CA. Fill patterns of symbols indicate classification of individual samples by CA. Upper/lower divided symbols indicate surface and deep sediment in core sampling, respectively.

向は玉置ら (2017) が同湾における調査で報告している、湾奥において 0.075 mm 未満のシルト及び粘土画分及び強熱減量が増加し、湾口においては 0.425 mm 未満の画が増加した傾向とも一致している¹⁷⁾。干潟底質中の有機物含有量はシルト及び粘土含有量と相関関係があると報告されている⁹⁾。また底質中の金属含有量は細粒画分においてその濃度が高いことが知られている²⁵⁾。以上の結果からクラスターの分離要因となった金属含有量と I.L. の差は底質の粒度組成の差によって生じたのではないかと推察された。

排水口 D.1 直下で採取した排水口からの流入物試料 D.1 は C IIb1 に属し、このクラスターには 2, 4, 6, 7S, 8S, 8D, 17, 24, 25S および 26D の 10 個の底質試料が属した。また C IIb1 に最も近いクラスターである C IIb2 には 1S, 1D, 3S, 5S および 5D の 5 個の底質試料が属した。**Fig. 3** に示すように、これらの 15 試料のうち、17, 24, 25S および 26D を除く 11 試料は湾奥に分布している。このため

排水口 D.1 からの負荷は主に湾奥の干潟の底質に影響を及ぼしていることが明らかとなった。**Fig. 3** に潮下帯として示すように波津々浦湾には南岸沿いと北岸沿いに大潮最干時においても潮下帯となる地盤高の低い地帯が存在する。この地帯は潮汐の干満時に潮汐流の水路となることが試料採取時における現場観察において確認されている。湾口部において C IIb1 に属した 17, 24, 25S および 26D の 4 試料はいずれもこの潮下帯沿いの地点で採取されていることから、引き潮時の潮汐流によって湾奥部の底質が湾口部潮下帯付近に移流拡散したため、排水口 D.1 からの負荷の影響が拡散したのではないかと考えられた。

C IIa に属した 4 試料には排水口 D.2 に由来する 2 試料 (D.2 および D.2D) が含まれた。**Fig. S1 (a)** に示すように、本調査の 1 年前の 2014 年 8 月には排水口 D.1 直下には、オレンジ色の砂防フェンスの内側に流入物の堆積が見られ、本調査時 (**Fig. S1 (b)**) においても同位置に流入物の堆積が確認された。一方で、本調査時の排水口 D.2 直下 (**Fig. S2 (a)**) では、堆積物は岩礁表面に付着する程度しか見られず、D.1 と比較して流入物が少ないことが推察された。このため、排水口 D.2 に由来する 2 試料の特性は、最も近い距離であった 13 および 25D を含むいずれの底質とも類似しておらず、排水口 D.2 からの負荷の波津々浦湾内の干潟底質に及ぼす影響はさほど大きくなく、他の起源と比較していない小さいと考えられた。排水口 D.2 から湾内への流入物が少なかった一因として、調査時に使用されていた D.2 の排水口 (**Fig. S2 (a)** 左側の白色樹脂管) においては、工事現場の排水柵に接続 (**Fig. S2 (b)** 青色樹脂管) されており、沈殿後の上澄みが排水されてことが挙げられる。この 2 つの排水口の排水方法と湾内底質への影響の差は、このような工事における土砂の流入防止措置の重要性を示唆していると考えられる。

C Ia には 10, 11, 14 および 15 の 4 試料が属した。これらの試料が分布する地点は **Fig. 3** に示す潮間帯の中央に位置し、調査時の目視による観察においても周辺より地盤高が高く、前述の潮汐流が生じる際にはすでに干出しており、その影響を受けにくい地点である。このためこれらの地点は排水口 D.1 の影響を受けなかったと考えられた。

C Ib には湾口に位置する 18S, 18D, 19S, 19D, 20S, 20D, 21S, 21D, 22, および 23, 湾央南岸よりに位置する 12, 16S および 16D と、湾奥に位置する 3D, 7D および 9 が属した。湾央に位置する 3 試料が分布した地点 12 および 16 は、いずれも南岸付近に分布した。これらの地点は、南岸沿いの地盤高が低い場所に生じる潮汐流の水路の付近に位置することから、湾口の地点と同様に湾外からの影響を受けやすい地点と考えられた。湾奥に位置する 3 試料のうち地点 9 で採取された試料 9 は北岸付近の地盤高の低い場所に生じる潮汐流の水路付近に位置することから、湾口の地点と同様に湾外からの影響を受けやすい地点と考えられた。これらの地点と湾口に位置し、C Ib に属した地点は排水口 D.1 とは異なる湾外からのなんらかの負荷の影響を受けた可能性が示唆された。

3.3 主成分分析による底質の起源解析

Table 2 に **Table S1** に示した 26 地点で採取した 38 個の底質試料および 3 つの排水口試料の各特性値に基づく

Table 2 Eigen values, contributions and Loadings of primary components.

		Primary components			
		PC1	PC2	PC3	PC4
Eigen values		3.8	2.0	1.5	0.97
Contributions (%)		34	18	14	8.8
Loadings	Al	-0.62	0.35	0.30	0.28
	V	-0.82	-0.32	0.19	0.042
	Mn	-0.072	-0.76	0.52	-0.094
	Fe	-0.74	-0.15	0.45	-0.24
	Ni [*]	-0.35	-0.46	-0.65	0.20
	Cu	-0.58	0.29	0.14	0.50
	Zn	-0.71	0.31	0.14	-0.066
	Cd	0.10	-0.78	-0.029	0.027
	Sb	-0.39	0.24	-0.091	-0.71
	Pb	-0.81	-0.31	-0.33	0.041
	LL	-0.61	0.11	-0.60	-0.14

*: V correlates with Cr, Co and Ba.

**: Ni correlates with Mo.

PCA での各主成分における固有値、寄与率および各特性値に対する因子負荷量を示した。固有値が 1 以上の値となった PC1 から PC3 の 3 つの主成分を対象に以下の検討を行った。PC1 においては Al, V, Fe, Zn, Pb および LL が -0.6 より小さい因子負荷量を示した。**Fig. 4 (a)** に PC1 対 PC2, **(b)** には PC1 対 PC3 の主成分平面上における各試料の分布を示した。**Fig. 4 (a)** および **(b)** のいずれにおいても C II に属する試料が左側に分布した。これは PC1 に対して負の因子負荷量を持つ前述の特性値、Al, V, Fe, Zn, Pb および LL が C II において高いことを示し、実際にこれらの特性値および **Table 1** で V と有意な相関を示した Cr, Co および Ba はいずれも 3.2 節でのべた C II と C I の間で有意な差 ($p < 0.05$) がみられた特性値であった。したがって、PC1 はシルト・粘土に起因すると考えられる底質中の金属含有量を示すと考えられた。

PC2 は Mn および Cd が -0.6 より小さい因子負荷量を示した。**Fig. 4 (a)** において C IIb2 は C IIb1 の上に分布した。これは PC2 に対して負の因子負荷量を持つ Mn および Cd が C IIb1 において C IIb2 より高いことを示す。C IIb1 は D.1 を含むクラスターであり、排水口 D.1 からの影響が最も強い試料が属すると考えられるクラスターである。したがって PC2 は排水口からの負荷を反映しており、Mn および Cd は排水口からの負荷を示す元素であり、この影響によって C IIb1 と C IIb2 が分岐したと考えられる。これらのうち、Cd の起源は定かではないが、Mn は鋼矢板の素材である冷間圧延鋼板の添加成分のひとつであり²⁶⁾、この工事現場では鋼矢板による止水工が施されていた。このため Mn はこの鋼矢板に起因するのではないかと考えられた。PC3 においては、Ni および LL の因子負荷量が -0.6 より低い値を示し、Ni と Mo は **Table 1** に示したように高い相関 ($R = 0.86$) を有した。このことから、PC3 の負の値は Ni および Mo に富む負荷源の影響を示唆すると考えられる。**Fig. 4 (b)** において C Ib2 は C Ib1 の下に分布しており、これは Ni およ

Fig. 4 Biplots of the first three components for individual samples. (a) PC 1 versus PC 2. (b) PC1 versus PC 3.

び Mo に富む負荷源の影響は C Ib2 に属した試料において C Ib1 に属した地点よりも高いことを示しており、この影響によって C Ib1 と C Ib2 が分岐したと考えられる。Suzuki ら (2017) は本研究のフィールドである波津々浦湾近傍で実施した東北沖津波における堆積物の起源の検討において、Ni および Mo がこの海域の海底質および海底質に由来する津波堆積物に特徴的な元素であると報告しており²⁰⁾、PC3 が示す負荷源にはこの海域の海底質に由来する砂泥が関与しており、湾外から流入している可能性が示唆される。Fig. 3 に示すように C Ib2 に属した試料が C Ib1 に属した試料と比較して、湾口よりの地点で採取されたことも負荷が湾外からもたらされていることを示唆している。

PC2 が示す排水口から流入する負荷は震災後の防潮堤工事に伴い生じたと考えられるが、PC3 が示す負荷はこの点が明らかでない。しかしながら PC2 が示す負荷が顕著であった湾口の地点においては、震災後のシルト・粘土分の増加が報告されている¹⁷⁾ ことから、負荷は震災に伴って生じた地盤沈下と津波による侵食による水深の変化や、湾周辺における復興工事による海域への土砂の流入といった何らかの変化に起因すると推察されるが、その直接の原因は現時点では明らかとなっておらず、今後更なる検討を要する。

4. 結論

本研究では、東日本大震災における東北沖津波によっ

てかく乱を受けた宮城県奥松島に位置する波津々浦湾干潟の回復過程における底質環境の変化に対する沿岸工事の影響を明らかにするために、以下の2つの検討を行った。第一に、干潟底質および排水口からの流入物の金属組成に基づくクラスター分析および主成分分析によって、干潟底質環境の変化の原因を検討した。第二に、第一の検討における諸原因の干潟底質に対する影響の空間的分布を検討した。結果、波津々浦湾の湾奥の干潟底質においては、湾奥に位置する防潮堤工事に伴う埋立現場の排水口 D.1 からの流入物の影響が確認された。Mn および Cd がこの流入物を指標元素となりうると考えられた。同様に湾口の干潟底質においては、湾外からの負荷の影響が確認され、Ni および Mo がこの指標元素となりうると考えられた。湾中央部の干潟底質においては、この負荷の影響は他の場所と比較して小さかった。

謝 辞

本研究は、科学研究費助成事業（若手研究（B））「藻場・干潟が震災により受けたダメージとその回復、および後背地の津波堆積物の特性」（24710080）の援助を受けて行われたことを記して謝意を表する。

付録：補足資料

補足資料は下記より閲覧可能である。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jswe/-char/ja/>

（原稿受付 2018 年 11 月 21 日）

（原稿受理 2019 年 3 月 5 日）

参 考 文 献

- 1) Ozawa, S., Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Tobita, M., Imakiiri, T., 2011. Coseismic and post seismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature* 475, 373-377.
- 2) Kanaya, G., Suzuki, T., Kikuchi, E., 2011. Spatio-temporal variations in macrozoobenthic assemblage structures in a river-affected lagoon (Idoura Lagoon, Sendai Bay, Japan): influences of freshwater inflow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92(1), 169-179.
- 3) Wu, C., Cai, F., Zhao, G., Zheng, Y., Lu, H., 2011. Impact of coastal engineering constructions on the topographic and morphological evolution of Quanzhou Bay, Fujian, China. *Ocean & Coastal Management* 54(7), 544-555.
- 4) Dyer, K.R., Christie, M.C., Wright, E.W., 2000. The classification of mudflats. *Continental Shelf Research* 20(10), 1061-1078.
- 5) 李正奎, 西嶋渉, 向井徹雄, 滝本和人, 清水徹, 平岡喜代典, 岡田光正, 1997. 自然および人口干潟における構造と有機物分解能の比較 - 広島湾におけるケーススタディー -. *水環境学会誌* 20 (3), 175-184.
- 6) 栗原康, 1988. 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー. 東海大学出版会, 東京, pp. 43-118.
- 7) 土屋誠, 栗原康, 1976. 宮城県蒲生干潟における底生動物の分布と微細粒子の挙動に関する研究. *生理生態* 17(1/2), 145-151.
- 8) Touch, N., 福井勝吾, 中下慎也, 福岡捷二, 日比野忠史, 2013. 疑似潮汐変動下で浸透する有機泥による透水係数の変動. *土木学会論文集 B1 (水工学)* 69(4), 559-564.
- 9) 李正奎, 西嶋渉, 岡田光正, 1999. 干潟造成における立地選定と土壤構造を決定する因子に関する研究. *水環境学会誌* 22(7), 595-599.
- 10) Chan, K., Bendell, L.I., 2013. Potential effects of an invasive bivalve, *Nuttallia obscurata*, on select sediment attributes within the intertidal region of coastal British Columbia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 444, 66-72.

- 11) Koppel, J., Herman, P.M.J., Thoolen, P., Heip, C.H.R., 2011. Do alternate stable states occur in natural ecosystems? Evidence from a tidal flat. *Ecology* 82(12), 3449-3461.
- 12) 岡田光正, 大沢雅彦, 鈴木基之, 1999. 環境保全・創出のための生態工学. 丸善, 東京, pp. 125-191.
- 13) 鈴木孝男, 2011. 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* 34(A) (12), 395-399.
- 14) 曹慶鎮, 丁仁永, 西嶋渉, 滝本和人, 岡田光正, 2003. 人工干潟の創出及び復元における斜面勾配の影響. *土木学会論文集* 727 (Ⅶ -26), 23-30.
- 15) 国土地理院, 2011. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下調査. URL: <http://www.gsi.go.jp/common/000060316.pdf> (2018 年 11 月時点).
- 16) 国土地理院, 2011. 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震後の地殻変動 (累積). URL: <http://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/210/image210/006-007.pdf> (2018 年 11 月時点).
- 17) 玉置仁, 齊藤愛実, 鈴木まゆみ, 小瀬知洋, 2017. 東日本大震災により攪乱を受けたアサリ群集のその後の変化, 第 51 回日本水環境学会年会講演集, p. 35.
- 18) Ismail, A., Toriman, M.E., Juahir, H., Zain, S.M., Habir, N.L.A., Retnam, A., Kamaruddin, M.K.A., Umar, R., Azid, A., 2016. Spatial assessment and source identification of heavy metals pollution in surface water using several chemometric techniques. *Marine Pollution Bulletin* 106(1-2), 292-300.
- 19) Lidia, K., Przemyslaw, N., 2017. The evolution of December 2004 tsunami deposits: temporal and spatial distribution of potentially toxic metalloids. *Chemosphere* 93(9), 1856-1865.
- 20) Suzuki, M., Kose, T., Tamaki, H., Kawata, K., 2018. Estimation of 2011 Tohoku-Oki Tsunami deposit origin using metal composition analysis. *Journal of Water and Environment Technology* 16(1), 1-17.
- 21) Nakamura, K., Kuwatani, T., Kawabe, Y., Komai, T., 2016. Extraction of heavy metals characteristics of the 2011 Tohoku Tsunami deposits using multiple classification analysis. *Chemosphere* 144, 1241-1248.
- 22) Mirella, P-I., Rodrigues, E.P-F., Lucimar, L.F., Joaquim, A.N., Carlos, A-H., Yoelvis, B-A., Mario, S.P-A., 2017. Combining contamination indexes, sediment quality guidelines and multivariate data analysis for metal pollution assessment in marine sediments of Cienfuegos Bay, Cuba. *Chemosphere* 168, 1267-1276.
- 23) Goldschmidt, L.H., 1954. Review-article. *Geological Magazine* 91(5), p. 415.
- 24) 今井登, 寺島滋, 太田充恒, 御子柴 (氏家) 真澄, 岡井貴司, 立花好子, 池原研, 片山肇, 野田篤, 富樫茂子, 松久幸敬, 金井豊, 上岡晃, 2010. 海と陸の地球化学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 茨城.
- 25) 寺島滋, 今井登, 立花好子, 池原研, 片岡肇, 岡井貴司, 御子柴 (氏家) 真澄, 太田充恒, 久保田蘭, 2008. 河川・海底堆積物の粒度分布に伴う元素濃度変化. *地質調査研究報告* 59(9/10), 439-459.
- 26) 日本工業規格, 2017. JIS G 3141 冷間圧延鋼板及び鋼帯. URL: <http://www.jisc.go.jp/pdfb4/PDFView/ShowPDF/jQEAAAXejLUoKuRVakea> (2018 年 11 月時点).

[論 文 要 旨]

東日本大震災における東北太平洋沖津波によって宮城県奥松島に位置する波津々浦湾干潟はかく乱を受け、アサリなどの底棲生物が大きく減少し、その後回復しなかったことが知られている。本研究では、この波津々浦湾干潟における震災後の回復過程に対する底質環境の変化への沿岸工事の影響を明らかにするために、干潟底質および排水口からの流入物の金属組成に基づくクラスター分析および主成分分析によって、干潟底質環境の変化の原因を検討した。その結果、湾奥に位置する防潮堤工事に伴う埋立現場の排水口からの流入物および湾外からの何らかの流入物の影響が確認された。また、第一の検討における諸原因の干潟底質に対する影響の空間的分布を検討した。その結果、湾奥においては排水口からの流入物の影響が強く、湾口においては、湾外からの何らかの流入物の影響が強かった。湾中央部の干潟底質において、この負荷の影響は他の場所と比較して小さかった。

キーワード：東日本大震災；干潟；底質；負荷源