

宮古湾津軽石川河口干潟における2019年・2020年 干潟ベントス調査結果とベントス群集の長期変化

阿部 博和^{1*}, 菅 孔太朗¹, 松政 正俊¹, 鈴木 孝男²,
木下今日子³, 柚原 剛⁴

(受理 2020年12月4日)

A survey report on intertidal macrobenthos species in Tsugaruishi River
estuarine tidal flat, Miyako Bay in 2019 and 2020 and long-term changes in
the macrobenthic community

Hirokazu ABE¹, Kotaro KAN¹, Masatoshi MATSUMASA¹, Takao SUZUKI²,
Kyoko KINOSHITA³, Takeshi YUHARA⁴

Abstract

Miyako Bay, located in the central part of the Sanriku coastline, northeastern Japan, was severely affected by the huge tsunami caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011. Several surveys of benthic animals were conducted in the Tsugaruishi River estuarine tidal flat at the innermost part of Miyako Bay in 2002, before the tsunami, and in 2011-2018, after the tsunami, and these surveys recorded the transition of the macrobenthic community in this area. In the present study, we report the results of macrobenthos surveys conducted in 2019 and 2020 at the Tsugaruishi river estuarine tidal flat, and analyzed long-term changes in macrobenthic communities including previous data in order to elucidate the responses of organisms to environmental changes caused by earthquakes, tsunamis, and reconstruction works including the construction of a giant seawall. In the present study, 93 and 99 species of benthic animals were recorded from the Tsugaruishi River estuarine tidal flat in 2019 and 2020, respectively. Including

¹ 岩手医科大学 教養教育センター 生物学科

Department of Biology, Center for Liberal Arts & Sciences, Iwate Medical University

² みちのくベントス研究所

Michinoku Research Institute for Benthos

³ 東北大学大学院 農学研究科

Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University

⁴ 東北大学大学院 生命科学研究所

Graduate School of Life Sciences, Tohoku University

* Corresponding author: Hirokazu Abe, E-mail: habe@iwate-med.ac.jp, abehiro13@gmail.com

previous data, 203 species of benthic animals (50, 52, 67, and 34 species of shellfish, polychaetes, crustaceans, and others, respectively) have been recorded from the tidal flat. Hierarchical cluster and nMDS analyses revealed that the macrobenthic community remained unstable for several years after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, while the community structure stabilized after 2017. In the study area, the construction of a giant seawall continued from April 2012 to March 2017, suggesting that the initial unstable period was due to environmental variability affected by the earthquake, tsunami, and the subsequent construction of the seawall, while the subsequent stable period was due to environmental stabilization after the construction of the seawall was completed. Although the relationship between the construction of the seawall and environmental changes is largely unclear, the construction process has been associated with visible changes in the environment, and it would not be misleading to assume that the large-scale environmental alteration during the construction of the seawall has led to long-term changes in the macrobenthic community.

キーワード：地震, 巨大防潮堤, マクロベントス群集, 干潟, 津波

Keywords : earthquake, giant seawall, macrobenthic community, tidal flat, tsunami,

緒言

三陸海岸の中央部, 重茂半島にいだかれた宮古湾は, 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波によって甚大な影響を受けた。奥行きおよそ10 kmに達する宮古湾の最奥部では, 南方から津軽石川が注ぎ, 陸中リアス海岸で最大規模の干潟が形成されている。この津軽石川河口干潟では, 環境省の第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査 (干潟調査) の一環として, 2002年に干潟ベントスの調査が行われており (環境省自然環境局生物多様性センター 2007), 津波後にも, 自然環境保全基礎調査の手法を用いた干潟ベントス調査 (2011~2015年, Kinoshita & Matsumasa 2016) や, 環境省の東北地方太平洋沿岸地域 生態系監視調査 (2012~2017年, 環境省自然環境局生物多様性センター 2013~2018) とそのフォローアップ調査 (2018年, 阿部他 2020) が行われてきた (表1)。

本研究では, 2019年と2020年に津軽石川河口干潟において生態系監視調査の手順に従った干潟ベントスの生息状況調査 (フォローアップ調査) を行ったので, その調査結果を報告する。また, 地震・津波の自然環境への影響や復興工事を含めた震災以降の環境変化の状況把握, そして, 長期的な環境変化に対する生物の応答の把握を目的として, 2002年以降の津軽石川河口干潟における調査結果を用いて干潟ベントス群集の長期変化についての解析と考察を行った。

材料と方法

2019年・2020年生態系監視調査フォローアップ調査

2019年の7月20~21日および2020年の7月19日と7月21日に, 津軽石川河口干潟 (図1) の生態系監視調査の調査ポイント (表2) において干潟ベントス調査を行った。調査手法は生態系監視調査の手法 (後述) に従った。

表1 自然環境保全基礎調査, 生態系監視調査, Kinoshita & Matsumasa (2016), 阿部他 (2020) における宮古湾津軽石川河口での干潟ベントスの調査の調査年, 調査日, 調査地点 (読替え前), 調査手法, 調査種別, 調査者の一覧

調査年	調査日	調査地点	調査手法*	調査種別	調査者	備考
2002	8月9日	A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2	A	定性	松政正俊, 内野敬, 松政高子, 松政里玖	第7回自然環境保全基礎調査
2011	8月11日	B1, C1,	A	定性	松政正俊, 牧陽之助, 竹原明秀, 梶原昌五, 板垣学, 近藤恵莉, 多田恭子, 畠山ゆうか	Kinoshita & Matsumasa (2016)
	8月12日	B2, C2, D1, D2, D3	A	定性	松政正俊, 牧陽之助, 竹原明秀, 梶原昌五, 板垣学, 近藤恵莉, 多田恭子, 畠山ゆうか	Kinoshita & Matsumasa (2016)
2012	7月9日	A1, B1, C1, C2	B	定性 + 定量	松政正俊, 鈴木孝男, 金谷弦, 板垣学, 近藤恵莉	平成24年度生態系監視調査
	8月5日	B1, B2, C1, C2, D2, D3	A	定性	木下今日子, 内野敬	Kinoshita & Matsumasa (2016)
2013	7月27日	A1, B1, C1, C2	B	定性 + 定量	松政正俊, 木下今日子, 岩村桐子, 田島由, 佐々木尚	平成25年度生態系監視調査
	7月27日	B1, B2	A	定性	松政正俊, 木下今日子, 岩村桐子, 田島由, 佐々木尚, 大竹美里	Kinoshita & Matsumasa (2016)
	8月7日	C1, C2, D1, D2, D3	A	定性	松政正俊, 木下今日子, 岩村桐子, 田島由, 佐々木尚, 大竹美里	Kinoshita & Matsumasa (2016)
2014	7月12日	D1, D2	B	定性 + 定量	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子	平成26年度生態系監視調査
	7月13日	A1, B1	B	定性 + 定量	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子	平成26年度生態系監視調査
	7月26日	B1, B2, E1, E2, E3, F1, F2, F3	A	定性	木下今日子, 内野敬, 中村凱, 綿川葵吾, 中村慎佑	Kinoshita & Matsumasa (2016)
2015	7月18日	A1, B1	B	定性	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子	平成27年度生態系監視調査
	7月19日	D1, D2	B	定性	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子	平成27年度生態系監視調査
	8月2日	B1, B2, B3, E1, E2, E3, F1, F2, F3	A	定性	木下今日子, 内野敬, 佐藤和人	Kinoshita & Matsumasa (2016)
2016	7月23日	A1, B1	B	定性 + 定量	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子, 村山恒也	平成28年度生態系監視調査
	7月24日	D1, D2	B	定性 + 定量	松政正俊, 鈴木孝男, 木下今日子, 村山恒也	平成28年度生態系監視調査
2017	7月23日	B1, D1, D2	B	定性 + 定量	松政正俊, 阿部博和, 鈴木孝男, 木下今日子, 井上隆, 村山恒也, 日高裕華	平成29年度生態系監視調査
	7月24日	A1	B	定性 + 定量	松政正俊, 阿部博和, 鈴木孝男, 木下今日子, 井上隆, 村山恒也, 日高裕華	平成29年度生態系監視調査
2018	7月28日	A1, B1, D1, D2	B	定性 + 定量	松政正俊, 阿部博和, 鈴木孝男, 木下今日子	阿部他 (2020)
2019	7月20日	A1, B1	B	定性 + 定量	阿部博和, 鈴木孝男, 木下今日子	本研究
	7月21日	D1, D2	B	定性 + 定量	阿部博和, 鈴木孝男, 木下今日子	本研究
2020	7月19日	A1, B1, D1, D2	B	定量	松政正俊, 阿部博和, 菅孔太郎	本研究
	7月21日	A1, B1, D1, D2	B	定性	松政正俊, 阿部博和, 菅孔太郎, 鈴木孝男, 柚原剛	本研究

*A: 自然環境保全基礎調査, B: 生態系監視調査

干潟ベントス群集の長期変化

2002年に行われた第7回自然環境保全基礎調査による干潟調査 (環境省自然環境局生物多様性センター 2007), 2011年から2015年に行われたKinoshita & Matsumasa (2016) の干潟ベントス調査, 2012年から2017年に行われた生態系監視調査 (環境省自然環境局生物多様性センター 2013~2018), そして, 2018~2020年に行われた生態系監視調査のフォローアップ調査 (阿部他 2020, 本研究) のデータを用いて, 津軽石川河口干潟における干潟ベントス群集の長期変化の解析を行った。これらの調査は, 自然環境保全基礎調査の調査手法を用いたものと生態系監視調査の調査手法を用いたものに大別され, 自然環境保全基礎調査の調査手法では定性調査のみが, 生態系監視調査の調査手法では, 2015年 (定性調査のみ) を除いて定性調査と定量調査の両方が行われている (表1)。以下に調査手法の概略について述べる。

・自然環境保全基礎調査の調査手法

岸から汀線にかけて3本のトランセクト (湾口部から湾奥部に向かってA, B, C) を設定し, 各トランセクト上に最も陸寄り, 最も汀線寄り, その中間の3ポイントを設定した。各調査ポイントでは5 m×5 m (25 m²) のコドラートを設定し, 最初の5分間は3名以上の調査者でコドラート内の底質表面で見られるベントスの種と個体数の多寡を記録した。次いで, 調査者2名が10分間, 統一規格のスコップ (金象印溝掘りショベル, 浅香工業) を用いて約20 cmの深さまで底質を掘り返し, 目視で発見できたベントスを採集した。現場で同定できる種については, 種名と個体数の多寡を記録してから放逐し, 現場で種名が判別できない種については, 10%中性ホルマリンで固定して研究室に持ち帰り同定を行った。

・生態系監視調査の調査手法

調査サイト（津軽石川河口干潟）内に自然環境保全基礎調査の調査ポイントと同じ場所に調査ポイントA1, B1, C1, C2を設定した。C1, C2の調査ポイントは防潮堤建設により2014年調査時には消失していたため、2014年から新たにD1, D2の調査ポイントを設定した。定量調査では、各調査ポイントに無作為に設定した3箇所において、15 cm径のコアサンプラーを用いて深さおよそ20 cmまでの底質を採取した。得られた底質は1 mm目合いの篩にかけ、篩上に残ったサンプルを全て10%中性ホルマリンで固定した。サンプルは研究室に持ち帰った後にソーティングを行い、80%エタノールに置換した後に生物の同定・計数を行った。2020年のフォローアップ調査では、定量サンプルはクーラーボックス内で冷却したまま持ち帰り、当日のうちにソーティングを行い80%エタノールで固定した後に生物の同定・計数を行った。定性調査では、調査ポイント毎に2名で15分間の生物探

表2 自然環境保全基礎調査, 生態系監視調査, Kinoshita & Matsumasa (2016) における宮古湾津軽石川河口での干潟ベントスの調査地点の地点名, 緯度経度と本研究にて緯度経度が近い地点を同一と見なして読替えたエリア・地点の一覧

エリア	本研究 地点	自然環境保全基礎調査		生態系監視調査		Kinoshita & Matsumasa (2016)			備考		
		地点	北緯	東経	地点	北緯	東経	地点		北緯	東経
A	A1	A1	39.5935	141.9466	A1	39.5935	141.9466				
	A2	A2	39.5936	141.9467							
	A3	A3	39.5938	141.9464							
B	B1	B1	39.5916	141.9485	B1	39.5916	141.9485	B1	39.5920	141.9481	
	B2	B2	39.5917	141.9488				B2	39.5921	141.9485	
	B3	B3	39.5919	141.9496				B3	39.5921	141.9490	
C	C1	C1	39.5911	141.9473	C1	39.5913	141.9477	D1	39.5912	141.9477	防潮堤建設で消失(2014年)
	C2	C2	39.5910	141.9472	C2	39.5908	141.9472	D2	39.5909	141.9474	防潮堤建設で消失(2014年)
	C3							C1	39.5917	141.9475	防潮堤建設で消失(2014年)
	C4							C2	39.5914	141.9475	防潮堤建設で消失(2014年)
	C5							D3	39.5901	141.9472	防潮堤建設で消失(2014年)
D	D1				D1	39.5887	141.9473				潮間帯中部
	D2				D2	39.5887	141.9473	F1	39.5886	141.9473	潮間帯下部
	D3							F2	39.5893	141.9473	
	D4							F3	39.5881	141.9473	
E	E1							E1	39.5896	141.9488	
	E2							E2	39.5896	141.9494	
	E3							E3	39.5895	141.9497	

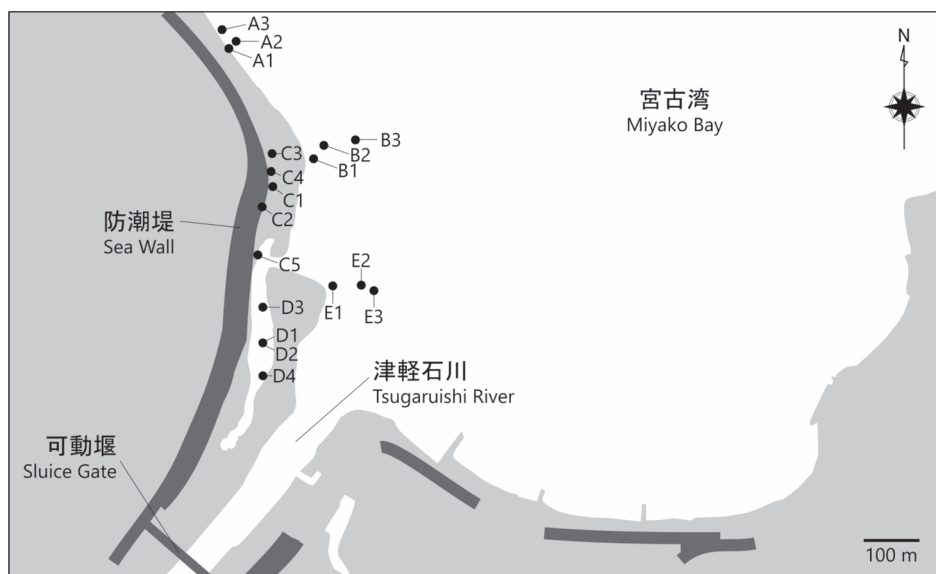


図1 津軽石川河口干潟調査サイトにおける調査エリアと読替え後の調査地点

索（スコップでの掘り返しを含む）を行い、発見した生物の種名を記録した。現地での同定が困難な種は、10%中性ホルマリンで固定して持ち帰り同定を行った。

Kinoshita & Matsumasa (2016) の調査では、自然環境保全基礎調査および生態系監視調査とは調査ポイントの名称に不一致が見られるため、緯度経度が近いポイントを同一ポイントと見なして地点番号を読替えた（表2）。また、各調査にて記録されたベントスの種構成を比較するために、出現種の学名と和名の表記は主に平成28年度生態系監視調査報告書の参考資料として附された出現種の整理表（環境省自然環境局生物多様性センター2017）および阿部他（2020）に従って整理した。なお、タカノケフサイソガニは2005年に新種として記載されたため（Asakura & Watanabe 2005）、2002年の調査時にはケフサイソガニと混同されていた可能性があるが、標本は未検討のため記録通り扱った。

ベントス群集の長期変動および地点間の差異を検討するため、在不在データを用いてエリアごとにJaccard係数を、生息密度データを用いて地点ごとにBray-Curtis非類似度を算出し、データ間の距離行列を作成した。その際、自然環境保全基礎調査の定性調査手法による各種の個体数の多寡のデータは在不在データに読み替えた。生態系監視調査の手法による調査では、自然環境保全基礎調査の定性調査手法のデータとの比較を行うために、定性調査のみと定性調査と定量調査の両方の結果を含めた2つの在不在データセットを作成した。生息密度データは、生態系監視調査の定量調査の3回のコアサンプルから得られた各種個体数の平均から算出した。なお、魚類と昆虫類は解析から除外し、調査期間を通して定性調査で一度しか記録されていない種と定量調査で1個体しか採集されていない種についても、偶発的な要素が大きいと考えられるため、それぞれ在不在データおよび生息密度データの解析から除外した。得られたJaccard係数とBray-Curtis非類似度の距離行列を基にデータ行列（エリア・地点）とその転置行列（種群）のそれぞれについてWard法を用いた階層的クラスタ分析を行うとともに、データ行列についてはnMDS（非計量多次元尺度構成法）によって得られた多次元のデータ分布を二次元平面上に図示した。階層的クラスタ分析の樹形図は、各種の在不在または生息密度を示したヒートマップとともに図示した。クラスタ分析の樹形図では、ある一定のクラスタ高（Clustering height）でエリア・地点と種群についてそれぞれクラスタとグループを区分した。一部のグループではデータの解釈の便宜上さらにサブグループに細分した。クラスタ間の群集構造の差異はペアワイズPERMANOVA（Permutational Multivariate Analysis of Variance）により多重検定を行った。その際、Benjamini-Hochberg法を用いて多重比較におけるp値の補正を行った。また、Indval（Indicator Value）法を用いた指標種分析により、有意にindval値が大きく各クラスタに特徴的な指標種の抽出を行った。これらの分析における有意水準は $p=0.05$ とした。以上のデータ解析は、統計解析ソフトR version 4.0.2（R Core Team 2020）においてvegan version 2.5-6（Oksanen et al. 2019）、gplots version 3.1.0（Warnes et al. 2020）、MASS version 7.3-53（Venables & Ripley 2002）、pairwiseAdonis version 0.3（Martinez-Arbizu 2020）、およびlabdsv version 2.0-1（Roberts 2019）パッケージを用いて行った。

結果と考察

2019年・2020年生態系監視調査フォローアップ調査

本調査により、2019年には津軽石川河口から93種（貝類23種、多毛類25種、甲殻類35種、その他10種）、2020年には99種（貝類27種、多毛類25種、甲殻類36種、その他11種）のベントスが記録された（表3、4）。

種レベルで同定されたもののうち、一連の津軽石川河口干潟における調査(表1)で今回初めて記録された種は、ヨメガカサ、ツボミ、クロツケガイ、エゾタマガイ、オウウヨウラク、エゾヒバリ、ライノサシバ、ヒナサキチロリ、フサウスウロコムシ、ミナミシログネゴカイ、コオニスピオ、オクダウミイサゴムシ、チシマフジツボ、ウンモンフクロムシ、ヒモハゼの15種であった。このうち、ツボミは宮城県のレッドリスト(RL)で絶滅危惧II類(VU)、環境省と日本ベントス学会のRLで準絶滅危惧(NT)に、ヒモハゼは宮城県と環境省のRLでNTに指定されている(日本ベントス学会2012, 宮城県2016, 環境省2020)。ヒナサキチロリは自然環境保全基礎調査では九州地方の4ヵ所で記録されているのみであり、その報告書で希少種または狭分布種に分類されている(環境省自然環境局生物多様性センター2007)。本種は過去に三陸沿岸(宮城県女川町石浜)から記録されており(Okuda 1939: *Hemipodus borealis*として記録されているが Böttgermann 2002 では *Hemipodia yenourensis*として扱われている)、今島(2007)では秋田沖からも記録されている。オクダウミイサゴムシはこれまで西日本を中心に記録されていたが(西他2012)、今回北限を大きく更新する形となった。2014年にKinoshita & Matsumasa(2016)によって25 m²コドラートの枠外で記録されていたスナガニ(宮城県RL: VU)は、2020年に6年ぶりに記録された。岩手県のレッドリストで情報不足(DD)に指定され、2017年の生態系監視調査で初めて記録されたものの2018年には確認できなかったアシハラガニは、2019年に多くの個体の生息が確認された。また、宮城県と日本ベントス学会のRLでNTに指定されているハウザワイソギンチャクと、宮城県のRLで要注目種とされているジャムシは、2018年に引き続き2019年と2020年の両年で記録された。ジャムシの固定後の疣足を除いた体幅は、2018年は4.5 mm (n=1)、2019年は5.0 mmと5.2 mm (n=2)、2020年は6.0~7.4 mm (平均6.7±0.72 mm, n=4)であり、ジャムシの産卵時期が5~7月と報告されていることから考えると(Izuka 1912, as *Nereis dyamusi*; Yokouchi 1985, 横内 1990, as *Neanthes virens*; see Villalobos-Guerrero & Bakken 2018)、2017年の加入群が2018年から2020年の間に継続して採集されたものと思われる。固定後の体長は、体幅5.2, 6.0, 6.2, 7.3 mmの個体でそれぞれ150(肛節を欠く)、189(完全個体)、307(完全個体、麻酔により弛緩)、235 mm(肛節を欠く)であり、3年をかけて体長200 mm前後に達する過程が観察された。

自然環境保全基礎調査と生態系監視調査のデータの比較

一般的に世代時間の短い小型種ほど年変動が大きいと、自然環境保全基礎調査と生態系監視調査のデータの比較においては、定性調査同士の結果で比較を行うことが望ましいことが予想される。このことを確認するために、自然環境保全基礎調査手法の在不在データ(定性調査結果)と生態系監視調査手法の在不在データ(定性調査の結果のみ)を使用したデータセット(図2A)と、自然環境保全基礎調査手法の在不在データと生態系監視調査手法の在不在データ(定性調査と定量調査の両方の結果)を使用したデータセット(図2B)のそれぞれにおいてクラスター分析を行ったところ、前者においてより同一エリアのデータが同一または近隣のクラスターに分類される傾向が見られた。小型種が記録されやすい定量調査の結果を含めた後者のデータセットで群集構造のばらつきが大きくなったものと考えられたことから、以後の両調査を含めた経年変化の解析では、定性調査のデータを用いた。定性調査同士で比較を行うと、両調査手法のデータは同一エリアでも別々のクラスターに分類されることが多く、調査手法間でのデータの差異が浮き彫りにされた。2012年のBエリアとCエリア、2013年のCエリアでは両調査手法における同年・同一エリアのデータが同じクラスターに分類されたのに対し、2013年のBエリア、2014年のBエリアとDエリア、2015年のDエリアは同年・同エリアのデータであるにもかかわらず異なるクラスターに分類された(図2A)。自然環境保全基礎調査の定性調

査では2～3箇所の25 m²コドラート内を集中的に探索したのに対し、生態系監視調査の定性調査ではエリア内で広く探索を行ったため、得られたデータに差異が生じたものと思われる。

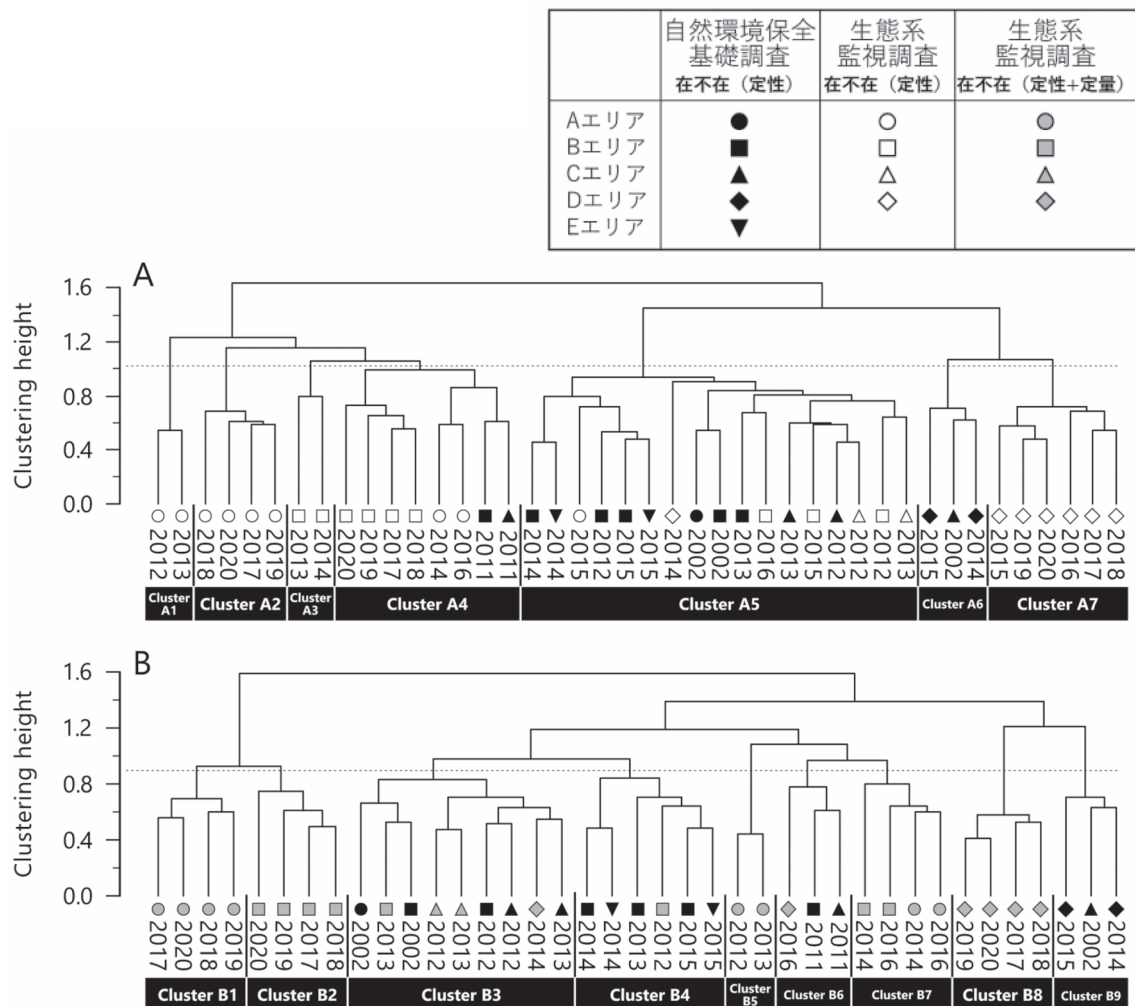


図2 2002～2020年の津軽石川河口干潟調査で得られた在不在データを用いたクラスター分析結果。A：自然環境保全基礎調査手法の在不在データ（定性調査）と生態系監視調査手法の在不在データ（定性調査の結果のみ）を使用したクラスター分析結果，B：自然環境保全基礎調査手法の在不在データ（定性調査）と生態系監視調査手法の在不在データ（定性調査と定量調査の両方の結果）を使用したクラスター分析結果。エリアとデータの別はそれぞれシンボルの形と色を分けて示した。

津軽石川河口干潟におけるベントス群集構造

これまでの調査結果を取りまとめたところ、津軽石川河口干潟から全体で203種（貝類50種、多毛類52種、甲殻類67種、その他34種）のベントス（昆虫類、底生魚類を含む）の記録が確認された。

在不在データ（定性調査）のクラスター分析の結果、クラスター高1.0付近で7つのクラスター（クラスターA1～A7）に区分された（図2A，図3）。ペアワイズPERMANOVAの多重検定では、クラスターA1 vs A2，A3，A6，A7；A2 vs A3；A3 vs A6を除いたクラスター間で有意差が認められた。クラスターA1，A2，A7はそれぞれAエリア，Bエリア，Dエリアのみから構成されたのに対し、クラスターA4，A5，A6は複数のエリアから構成された。種群はクラスター高

1.8 付近で5つのグループ(グループA1~A5)に区分された(グループA3は便宜的にA3-1とA3-2に細分した)。グループA3の種群は調査サイト全体で頻繁にみられ、A1のグループは生息数はそれほど多くはないもののサイト内で広く分布する傾向が見られた。その他のグループの種群は比較的狭いエリアでのみ記録されていた。Indval法による指標種分析ではクラスターA5を除いて指標種が抽出され、クラスターA1ではトンガリドロクダムシ、クラスターA2ではマガキとグループA4の8種(アミメオニスピオ、ニッポンモバヨコエビ、ドロクダムシ科、イワフジツボ、ベッコウガサ、ヒメエゾボラ、*Barleeia*属の一種、ニセスナホリムシ)およびグループA5の7種(ナミイソカイメン、カギノテスピオ、イガイ、ツツオオフエリア、ムラサキインコ、エゾカサネカンザシ、*Crangon*属の一種)、クラスターA3ではイシダタミ、カスミアオガイ、アサリ、クラスターA4ではイソコツブムシとコケゴカイ、クラスターA6ではグループA3-1の5種(ソトオリガイ、ホソウミニナ、*Heteromastus*属の一種、イソシジミ、カワザンショウガイ)、クラスターA7ではグループA2の4種(イソミズ、イトメ、ハマダンゴムシ、キタフナムシ)とヤマトカワゴカイもしくはヒメヤマトカワゴカイが指標種として抽出された。全体の傾向を見ると、Aエリアでは比較的波あたりのある場所や砂泥底を好むGroupA4、A5に分類される種群が、Dエリアでは汽水域や泥干潟を好むグループA2やA3-1に分類される種群が主要な構成群となっていた。B、C、EエリアではAエリアとDエリアの間の移行的な環境のもとで両エリアとは異なる種群が卓越することで、津軽石川河口干潟全体では概ねエリアごとに群集構造に違いが見られたものと思われる。

生態系監視調査手法の生息密度データのクラスター分析では、クラスター高1.0付近で8つのクラスター(クラスターC1~C8)に区分された(図4)。ペアワイズPERMANOVAの多重検定では、C2vsC7;C3vsC6,C7,C8;C5vsC7;C6vsC7,C8;C7vsC8を除いたクラスター間において有意差が認められた。クラスターC1は主にC2とD1地点、クラスターC2はD2地点のみ、クラスターC3とC4は主にB1地点、クラスターC5とC6はA1地点のみ、クラスターC7とC8は複数の地点から構成された。種群はクラスター高1.7付近で5つのグループ(グループC1~C5)に区分された(グループC1は便宜的にC1-1とC1-2に細分した)。グループC1-1は調査サイト内で卓越する種群を含み、サイト内に広く分布する傾向がみられた。その他のグループの種群はサイト内で分布が偏る傾向が見られた。指標種分析ではクラスターC1とC8を除いて指標種が抽出され、クラスターC2ではグループC1のヤマトスピオ、ヤマトカワゴカイもしくはヒメヤマトカワゴカイ、*Heteromastus*属の一種、ニッポンドロソコエビ、クラスターC3ではイソコツブムシ、ヨーロッパフジツボ、タマキビ、クラスターC4ではコケゴカイ、クラスターC5ではグループC2のナガホコムシ、マルソコエビ科、ツツオオフエリア、アミメオニスピオ、ヒゲスピオ種群の一種、クラスターC6ではチロリ、クラスターC7ではイソシジミが指標種として抽出された。以上の結果をまとめると以下のように概観される。A1地点では、2012年から2016年の間にはクラスターC3、C7、C8の地点と有意差の見られない比較的特徴に乏しい群集構造が形成されていたが、2017年以降はグループC2の種群が卓越する特徴的な群集構造が形成されている。B1とC1地点では類似する群集構造が見られ、2012年ではイソシジミが、それ以降はイソコツブムシやコケゴカイが卓越する群集が形成されている。C2とD1地点では指標種の不在という特徴が見られ、2017~2018年を除き*Heteromastus*属の一種が高密度で生息している。D2地点では群集構造の年変動が小さく、汽水域や泥干潟を好んで生息するヤマトスピオ、カワゴカイ類、*Heteromastus*属の一種、ニッポンドロソコエビが卓越する。

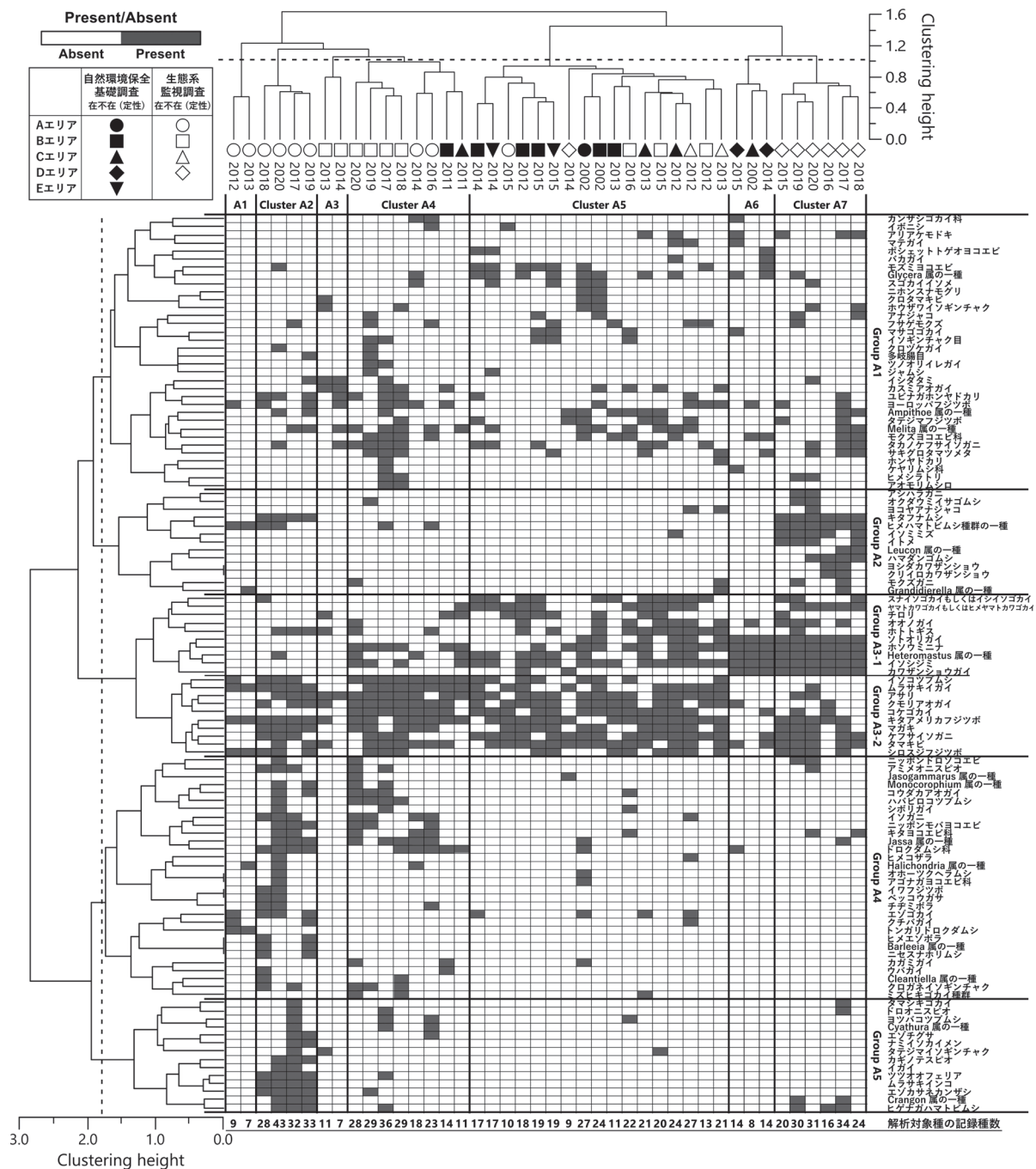


図 3 2002～2020年の津軽石川河口干潟調査で得られた在不在データ（定性調査結果のみ）を用いたクラスター分析結果と各種の在不在のヒートマップ. エリアとデータの別はそれぞれシンボルの形と色を分けて示した. 各データにおける各種の在不在はヒートマップ上でそれぞれグレーと白で示した.

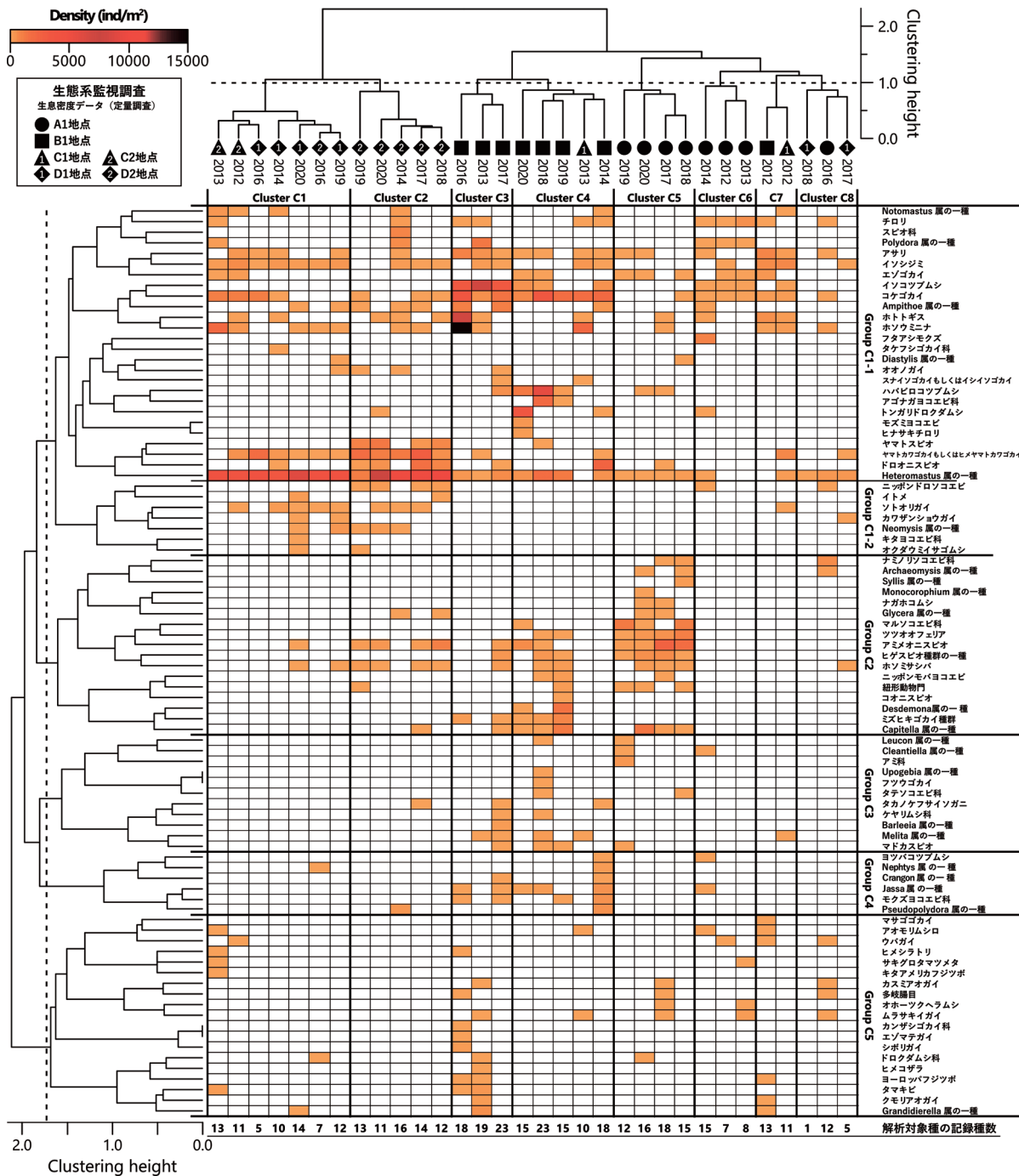


図4 2002~2020年の津軽石川河口干潟調査で得られた生息密度データを用いたクラスター分析結果と、各種の生息密度 (ind/m²) のヒートマップ。エリアの別はそれぞれシンボルの形とシンボル内の数字で示した。各データにおける各種の生息密度はヒートマップの色で示した。

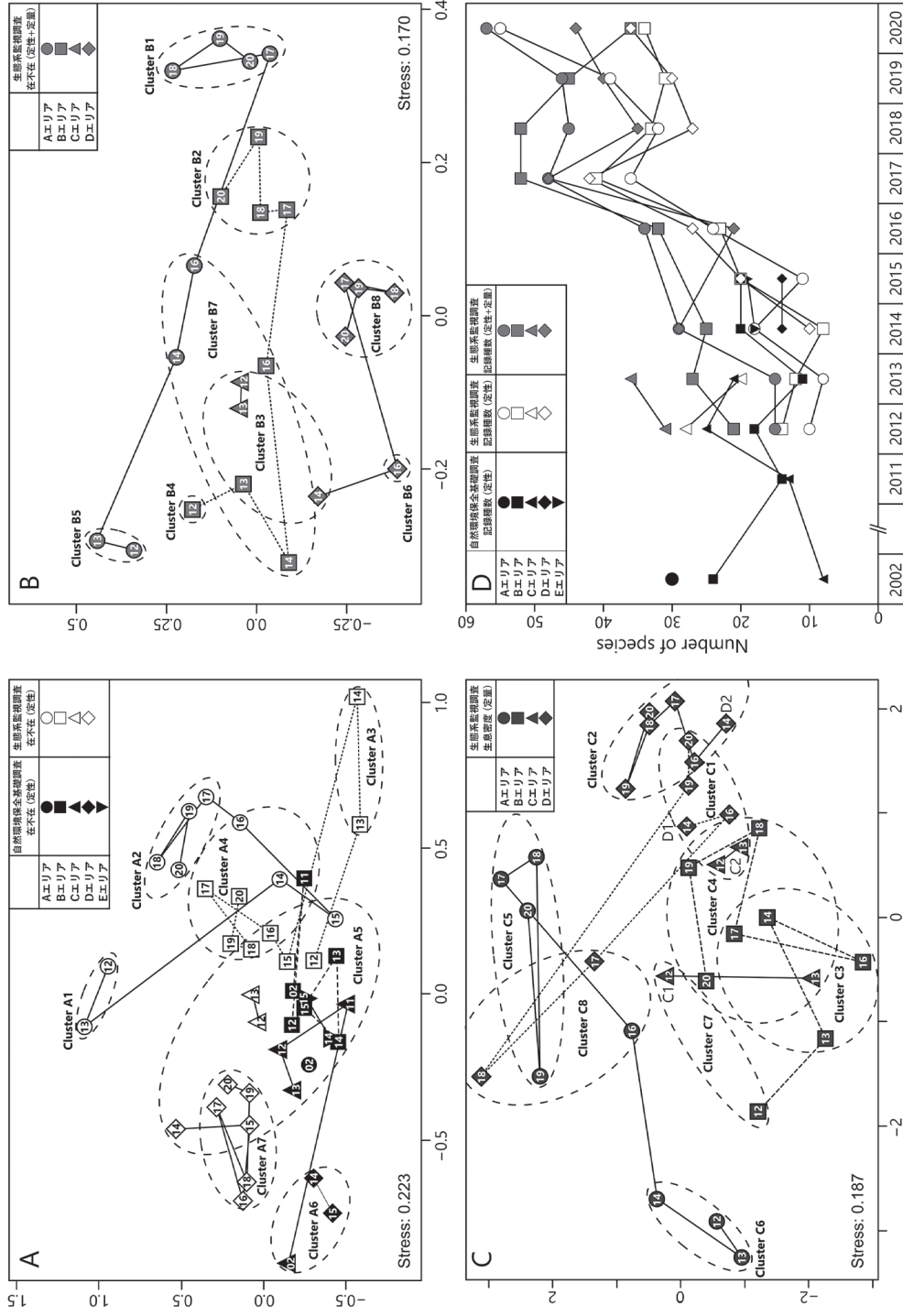


図5 2002～2020年の津軽石川河口干潟調査で得られたデータを用いたnMDSプロット (A～C) と記録種数の推移 (D)。A：自然環境保全基礎調査手法と生態系監視調査手法の不在データ (定性調査の結果のみ) を使用した各エリアのnMDSプロット, B：生態系監視調査手法の不在データ (定性調査と定量調査の両方の結果) を使用した各エリアのnMDSプロット, C：生態系監視調査手法の生息密度データ (定量調査) を使用した各地点のnMDSプロット, D: エリアごとの全記録種数 (昆虫類や魚類を含む) の推移。エリアとデータ種の別はそれぞれシンボルの形と色を分けて示した。シンボル内の数字は調査年の下2桁の数字を示す。破線で示した円はクラスタ分析で区別された各クラスタの範囲を表す。

津軽石川河口干潟におけるベントス群集の長期変化

定性調査のみの在不在データを用いたnMDSの結果、自然環境保全基礎調査の調査手法と生態系監視調査の調査手法では各エリアの群集構造の推移に概ね同様の傾向が見られたが、一部で異なる部分も見られた(図5A)。自然環境保全基礎調査の調査手法では、Bエリアは2011年を除きクラスターA5にまとまってプロットされたが、生態系監視調査の手法では2012年から2016年までの期間にクラスター間を移動する大きな変動が見られた。Cエリアでは、両手法でクラスターA5にまとまってプロットされたが、自然環境保全基礎調査の2002年のデータのみ群集構造が大きく離れていた。Dエリアは、2014年の生態系監視調査のデータを除き、両手法でそれぞれクラスターA6とA7にまとまってプロットされた。自然環境保全基礎調査の手法でのみ調査が行われたEエリアは、BエリアやCエリアと同様にクラスターA5にまとまってプロットされた。生態系監視調査の手法でのみ調査が行われたAエリアでは、2013年から2017年の間に群集構造が大きく変動した。なお、自然環境保全基礎調査により2002年に得られたAエリアのデータは2012年以降の生態系監視調査のデータとは大きく離れていた(図5A)。

生態系監視調査の定性調査と定量調査を合わせた在不在データ(図5B)と定量調査の生息密度データ(図5C)のnMDSの結果では、定性調査のみの在不在データを用いたnMDSの結果(図5A)と群集構造の推移に共通する傾向が見られた。Aエリアでは、2013年から2017年の間には群集構造が大きく変動したのに対し、2017年から2020年の間には安定した群集構造が形成されていた。Bエリアにおいては、2012年から2017年の間に大きな変動が見られ、その後安定した。Cエリアでは、C1地点の生息密度データでのみ2012年と2013年の間に大きな変化が見られた。Dエリアは、在不在データ(定性+定量調査)では2014年から2017年の間に大きな変動が見られたものの(図5B)、生息密度データでは、ベントスの生息密度が低下した2017年と2018年のD1地点を除き、D1、D2地点それぞれで同一クラスター内にまとまってプロットされた。

以上の結果をまとめると、津軽石川河口干潟におけるベントス群集の長期変化は以下のように概観される。Aエリアでは東北地方太平洋沖地震前後で大きく異なる群集構造が見られ、震災後も2017年までは群集構造が安定しないまま推移し、それ以降は震災以前とは異なる群集構造で安定した。Bエリアでは震災前後で群集構造に大きな変化は見られないが、震災以降不安定な状態が続き、2017年以降は安定した。Cエリアでは、BエリアとDエリア間の移行的な特徴が見られ、C1とC2地点は距離的には近いものの群集構造が異なる。C1地点では2012年と2013年の間に群集構造が大きく変化した。Dエリアは静穏な環境のためベントスの群集構造も比較的安定しているが、2014年~2017年にかけては群集構造が変動し、2017年以降は安定した。

いずれの地点においても、震災以降は群集構造が不安定な状況が数年間続き、2017年以降に群集構造が安定化しているという特徴が見られた。震災後の群集構造が不安定な期間は大きく2つのフェーズに分けることができ、2011年から2015年までは記録種数が横ばいのまま群集構造が変動しているフェーズ、2015年から2017年までは記録種数の増加に伴い群集構造が変化したフェーズとみることができる(図5D)。調査サイトの陸側に位置する宮古市金浜地区では、2012年4月に防潮堤の建設が着工され、2017年の3月に竣工されている。つまり、前者のフェーズは震災・津波とその後の防潮堤建設の影響を受けた環境が変動的な時期、後者のフェーズは防潮堤建設が終了し環境が安定してきた時期であるといえる。防潮堤建設の過程においては、2014年にCエリアが埋め立てられる(環境省自然環境局生物多様性センター2015)、2015年にはAエリアの潮上帯の砂浜が、2016年にはAエリア陸側の潮間帯上部の一部が埋め立てられ失われる(環境省自然環境局生物多様性センター2016, 2017)、2016年頃から防潮堤工事の進行とともにDエリア上流部に陸側の淡水が流入するようになり、

塩分が低下する（環境省自然環境局生物多様性センター 2017）など、目に見える形での影響が確認されている。また、2012年から2014年の間にはDエリアの人工水路内で砂泥の堆積が進行して浅化するとともに干潟の面積が拡大し、2014年からCエリアの代替調査エリアとなっている。このDエリアの底質は、潮間帯中部から上部では砂泥、潮間帯下部では軟泥となっており、潮間帯下部では2017年から軟泥の還元化がみられている（環境省自然環境局生物多様性センター 2018）。2017年の調査時には、Aエリア北側を除いて調査地付近の防潮堤工事はほぼ完了し、波当たりが比較的強かったAエリアでは波当たりが若干弱くなり底質の粒度がやや細くなる変化、Bエリアでは底質の状態（転石・礫の多い砂泥質）は変わらないものの地形がわずかに海側に張り出すなどの変化が見られているが（環境省自然環境局生物多様性センター 2018）、それ以降は2020年まで同じ状況が続いているといえる。防潮堤の建設工事と環境の変化との関連には不明な部分も多いが、大規模な環境改変によりベントス群集が長期的に変化してきたと考えるのは決して的外れではないだろう。

謝辞

本研究を行うにあたり、内野敬氏（宮城県仙台二華高等学校）、牧陽之助氏、竹原明秀氏、梶原昌五氏、板垣学氏、近藤恵莉氏、多田恭子氏、岩村桐子氏、田島由氏、佐々木尚氏、大竹美里氏、畠山ゆうか氏、中村凱氏、綿川奨吾氏、中村慎佑氏、佐藤和人氏（岩手大学）、金谷弦氏（国立環境研究所）、井上隆氏、村山恒也氏、日高裕華氏（自然環境研究センター）、前川賢一氏（津軽石牡蠣養殖組合）、松政尚子氏、松政里玖氏には現地調査時に多大なるご協力をいただいた。また、阿部温子氏、千葉晴美氏、馬場暁子氏にはベントスのソーティング作業にご助力いただいた。本研究の一部は、（独）環境再生保全機構環境研究総合推進費の研究課題（JPMEERF20204R01）の一環として行われた。この場を借りて深甚なる謝意を表す。

引用文献

- 阿部博和、松政正俊、木下今日子、鈴木孝男、金谷弦（2020）宮古湾津軽石川河口干潟における2018年干潟ベントス調査の報告（東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査の補足調査）。みちのくベントス4：12-21.
- Asakura A, Watanabe S (2005) *Hemigrapsus takanoi*, new species, a sibling species of the common Japanese intertidal crab *H. penicillatus* (Decapoda: Brachyura: Grapsoidea). *Journal of Crustacean Biology* 25 : 279-292.
- Böttgermann M (2002) Revision of the Glyceridae Grube 1850 (Annelida: Polychaeta). *Abhandlungen der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft* 555 : 1-249.
- 今島実（2007）環形動物 多毛類 III. 生物研究社. 499 pp.
- Izuka A (1912) The errantiate polychaeta of Japan. *Journal of the College of Science, Imperial University, Tokyo* 30 : 1-262, 24 pls.
- 環境省（2020）環境省レッドリスト2020. <http://www.env.go.jp/press/107905.html>
- 環境省自然環境局生物多様性センター（2007）第7回自然環境保全基礎調査浅海域生態系調査（干潟調査）業務報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 344 pp.
- 環境省自然環境局生物多様性センター（2013）平成24年度東北地方太平洋沿岸地域自然環境調査等業務報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 513 pp.
- 環境省自然環境局生物多様性センター（2014）平成25年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 192 pp.

- 環境省自然環境局生物多様性センター (2015) 平成26年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 237 pp.
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2016) 平成27年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 204 pp.
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2017) 平成28年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 74 pp.
- 環境省自然環境局生物多様性センター (2018) 平成29年度東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 55 pp.
- Kinoshita K, Matsumasa M (2016) Effects of the Great East Japan Earthquake on intertidal macrobenthos in Iwate Prefecture. In: Urabe J., Nakashizuka T. (eds) Ecological Impacts of Tsunamis on Coastal Ecosystems. Ecological Research Monographs. Springer, Tokyo. pp. 133-149.
- Martinez-Arbizu P (2020) pairwiseAdonis: Pairwise multilevel comparison using adonis. R package version 0.4
- 宮城県 (2016) 宮城県の絶滅のおそれのある野生動植物. 宮城県環境生活部自然保護課, 503 pp.
- 日本ベントス学会 (2012) 干潟の絶滅危惧動物図鑑—海岸ベントスのレッドデータブック. 東海大学出版会, 285 pp.
- 西栄二郎, 片岡大輔, 吉田裕之, 森敦史, 水永勲 (2012) 斐伊川水系宍道湖と中海から採集されたオクダイサゴムシ (新称) *Pectinaria okudai* (多毛綱: ウミイサゴムシ科). 南紀生物 54 : 141-143.
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlenn D, Minchin PR, O'Hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H (2019) vegan: Community Ecology Package. R package version 2.5-6. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- Okuda S (1939) Annelida Polychaeta in Onagawa Bay and its vicinity. II. Polychaeta Errantia with some addenda of Polychaeta Sedentaria. Reports of the Tohoku Imperial University, 4th series, Biology 14 : 219-244.
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Roberts DW (2019) labdsv: Ordination and Multivariate Analysis for Ecology. R package version 2.0-1. <https://CRAN.R-project.org/package=labdsv>
- Venables WN, Ripley BD (2002) Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0
- Villalobos-Guerrero TF, Bakken T (2018) Revision of the *Alitta virens* species complex (Annelida: Nereididae) from the North Pacific Ocean. Zootaxa 4483 : 201-257.
- Warnes GR, Bolker B, Bonebakker L, Gentleman R, Huber W, Liaw A, Lumley T, Maechler M, Magnusson A, Moeller S, Schwartz M, Venables B (2020) gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data. R package version 3.1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=gplots>
- Yokouchi K (1985) Reproduction and larval ecology of the sandworm *Neanthes virens* (Sars) from the southern Hokkaido. Bulletin of Plankton Society of Japan 32 : 1-13.
- 横内克己 (1990) *Neanthes virens* (多毛類, ゴカイ科) の初期発育段階にみられる光反応行動の変化. 東北区水産研究所研究報告 52 : 79-86.