

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.59 No.3 Dec 2020

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 地盤及び水理外力の特性を考慮した吸い出し・空洞形成・陥没機構とフィルター材による抑止法の研究
工代 健太・佐々 真志・梁 順普・高田 康平・鈴木 高二朗…………… 1
2. 干潟及び砂浜における沿岸底生生態-地盤環境動態の統合評価予測技術の開発と適用
梁 順普・佐々 真志・工代 健太・高田 康平……………21

干潟及び砂浜における沿岸底生生態-地盤環境動態 の統合評価予測技術の開発と適用

梁 順普*・佐々 真志**・工代 健太***高田 康平****

要 旨

本報告は、筆者らが開拓・推進してきている生態地盤学の展開によって得られた知見、即ち、干潟及び砂浜における多種多様な生物生態に果たす地盤環境動態の役割に基づき、沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全・再生に活用しうる沿岸底生生態-地盤環境動態の統合評価予測技術の開発を目的とし、国内外の現地調査、室内試験・分析及び数値解析を実施した。得られた主な知見は次のとおりである。

1) 干潟及び砂浜底生生物の住活動の限界場の相互関係を統一的に表す生物住環境診断チャートを新たに拡張した。当該チャートに基づくサクシオンを核とした地盤環境動態と生物種の多様性の間の密接な関係は、複数の造成干潟における現地観測事実とよく整合していることを明らかにした。

2) 砂浜と潮差の違い及び潮位の変動に関わらず、砂浜潮間帯に生息する小型底生端脚・等脚類の生物分布には共通的な地盤環境適合場が存在することを明らかにした。

3) 高波・台風イベントによる砂浜及び干潟地形変化に伴う底生生物分布の変化は、サクシオンを核とした地盤環境適合場と密接な関係があり、各種底生生物に固有の地盤環境適合場に従って多様な生物分布変化が発現していることを明らかにした。

4) 拡充・発展した生物住環境診断チャートと飽和・不飽和浸透流解析法を組み合わせた沿岸底生生態-地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築し、現地海浜・干潟への適用を行った。その結果、当該プラットフォームは台風・高波イベントに伴う干潟及び砂浜地形の大変化に伴う各種の底生生物分布域の移動・拡大を整合的に予測・再現することを明らかにし、その有効性を包括的に実証した。当該プラットフォームは、干潟・砂浜を含む沿岸環境の整備・維持管理及び地球規模の気候変動に伴う沿岸地盤環境及び沿岸生態系の変化を定量的に評価・予測しうる基盤として有効に活用することが期待できる。

キーワード：干潟，砂浜，生物多様性，サクシオン，地盤環境動態，底生生物分布

* 地盤研究領域・動土質研究グループ・専任研究員

** 地盤研究領域・動土質研究グループ長

*** 地盤研究領域・動土質研究グループ・研究官

**** 地盤研究領域・動土質研究グループ・研究員

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 E-mail：yan-s2@p.mpat.go.jp

Development and application of integrated platform for predicting and evaluating coastal benthic ecology-geoenvironmental dynamics

Soonbo YANG*
Shinji SASSA **
Kenta KUDAI ***
Kouhei TAKADA****

Synopsis

The purpose of this study is to develop an integrated platform to predict and evaluate coastal benthic ecology-geoenvironmental dynamics based on a new cross-disciplinary research field called Ecological Geotechnics, and to apply the developed integrated platform to fields such as tidal flat and sandy beach. The principal findings and conclusions obtained through integrated studies of field observations/surveys, laboratory experiments, and numerical analyses are as follows.

1) We developed an ecohabitat chart showing a complex interrelationship of the linkage between the habitat geophysical environments and diverse biological activities of diverse macroinfauna inhabiting tidal flats and sandy beaches. The ecohabitat chart showed that there is a close relationship between species diversity and geoenvironmental dynamics. Such species diversity-geoenvironmental dynamics relationship was found to be consistent in nature with the field evidence from two habitat restoration projects. 2) The distributions of amphipod and isopod species inhabiting the surficial sediments of sandy beach were associated with common geoenvironment for each species in all sandy beaches, despite different tidal range and its variations. The tide-induced variations in suction was responsible for the cross-shore distribution changes of those benthic species studied. 3) The variations in the developed suction consistently and quantitatively accounted for the changes in benthic species distribution, associated with the event-induced morphological changes in sandy beaches and tidal flat. 4) The developed integrated platform consistently predicted the distribution changes of diverse benthic species, associated with storm- and typhoon-induced morphological changes in tidal flats and sandy beaches, and demonstrated its effectiveness in a comprehensive manner.

These findings are expected to facilitate the prediction and evaluation of benthic species responses to geoenvironmental changes in coastal ecosystems, for conservation, restoration and management of tidal flats and sandy beaches.

Key Words: Tidal flat, sandy beach, biological diversity, suction, geoenvironmental dynamics, benthic species distributions, restored habitat

* Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department
** Head of Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department
*** Research Engineer, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department
**** Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan. Port and Airport Research Institute, National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology, National Research and Development Agency
Phone: +81-46-844-5054 Fax: +81-46-844-4577 E-mail: yan-s2@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	21
1. 序論	25
2. 多種多様な生物住環境診断チャートの拡張	26
2.1 はじめに	26
2.2 干潟・砂浜の土砂物理環境に果たすサクシヨンの役割	26
2.3 拡充・発展した生物住環境診断チャートと考察	28
2.4 まとめ	28
3. 潮差が大きく異なる砂浜潮間帯に生息する底生端脚類・等脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性	30
3.1 はじめに	30
3.2 土砂物理環境と底生生物分布の一体調査	31
3.3 砂浜の底生生物分布に果たす地盤環境動態の役割	32
3.4 底生端脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性	34
3.5 底生等脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性	37
3.6 まとめ	38
4. 高波イベントによる砂浜地形変化に伴う底生生物の生息分布変化と地盤環境適合場の検証	39
4.1 はじめに	39
4.2 土砂物理環境と底生生物分布の一体調査	40
4.3 砂浜地形変化に伴う地盤物理環境の変化	41
4.4 砂浜地形変化に伴う底生生物分布変化	42
4.5 まとめ	46
5. 台風イベントによる干潟地形変化に伴う底生生物の生息分布変化と地盤環境適合場の検証	49
5.1 はじめに	49
5.2 台風イベントによる干潟の地形・粒度動態	49
5.3 台風イベントによる干潟底生生物分布の変化と地盤環境適合場の検証	51
5.4 まとめ	53
6. 沿岸底生生態－地盤環境動態の統合評価予測プラットフォームの開発と適用	53
6.1 はじめに	53
6.2 沿岸底生生態－地盤環境動態統合評価予測プラットフォームの構築	53
6.3 干潟・砂浜地形変化に伴う地盤環境動態・底生生物分布変化の予測と検証	54
6.4 まとめ	59
7. 結論	59
謝辞	60

参考文献	60
付録A	66

1. 序論

大気・海・地盤が出会う場である干潟及び砂浜は、沿岸環境の重要構成要素であり、人間の様々な活動の場、多様な生物の生息場、自然災害からの防災及び高い水質浄化機能等の様々な機能を持っており、その価値が高く評価されている^{1),2)}。それゆえ、干潟・砂浜のような沿岸環境の維持管理及び沿岸生態系の保全は、人類の現在と未来の為にも重要なことである。又、近年、国内外で地球規模の気候変動に伴う海面上昇・台風の巨大化によって沿岸域への影響が深刻化しており、沿岸環境の適切な維持・管理及び沿岸生態系の保全のために沿岸環境及び沿岸生態系の定量的な評価・予測の必要性が高まっている。このような背景から、沿岸環境及び沿岸生態系の定量的な評価・予測手法の開発を目指して、生態学及び海岸工学の分野から活発に研究がなされてきており³⁾⁻²⁰⁾、水質(水温、塩分等)、水理環境(流れ、波、潮位等)、底質特性(粒径、細粒分含有率、有機物含有率等)及び地形特性(地盤高)を主として多くの知見が蓄積されている^{3)-7),9),12)-15),17)}。しかし、多種多様な底生生物が生息する地盤内部の土砂環境動態と生物活動のリンクについては、従来、研究が実質的に進んでおらず理解が乏しく留まっていた背景があった。

筆者らは、このような隘路を切り開くために、水—地盤—生態を融合した新たな学際領域として、生態地盤学を先駆的に開拓・推進してきている。具体的には、干潟及び砂浜における地盤表層の土砂環境動態を体系的に捉えうるモニタリング・評価手法を開発し、観測・実験・解析の協働によって、波の遡上や潮汐作用による地下水位変動に伴う土砂内部の水分張力を表すサクシジョンの動態が、多様な底生生物が生息する表層土砂の間隙、剛性、硬さ等の生物住環境を形成する上で本質的な役割を担っており、生物住環境の顕著な時間的空間的变化を引き起こすことを明らかにしている²¹⁾⁻²⁵⁾。このようなサクシジョンの動態による土砂収縮とせん断強度の増加は、地形動態²⁶⁾や堆積構造の形成²⁷⁾にも重要な役割を果たしており、サクシジョンを核とした地盤環境動態が多様な生物活動の適合・限界場を支配していることを明らかにしている^{21),23)-25),28)-32)}。又、上述のような生態地盤学の展開により構築・開発した多種多様な生物住環

境診断チャートならびに安定地形の最適設計は、全国各地の干潟・砂浜の生物生息分布と良く整合すると共に、複数の干潟・浅場造成事業での検証を通じて有効性が実証されている^{21),24),33)}。

本報告では、上述の筆者らの知見に基づいて、沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全に活用しうる基盤として、沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築し、現地への適用を行い、当該プラットフォームの有効性を検証することを目的としている。

2章では、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態を統合的に評価予測しうる沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測技術の柱の一つとして、筆者らが開発した既往の多種多様な生物住環境診断チャート²⁴⁾を拡充・発展させると共に^{25),34)}、その有効性について検証している。

3章では、潮汐環境が大きく異なる砂浜潮間帯に生息する小型底生端脚類及び小型底生等脚類の生息分布と地盤環境適合場の一般性³⁵⁾⁻³⁸⁾について述べる。

一方、多様な生物が生息する水際地盤は、地震・津波等のイベントにより大きく流動しうる³⁹⁾。実際、干潟・砂浜の生物生態は、日々の波浪及び干満に伴う環境動態とともに、高波・台風等のイベント過程にも適応する必要があり、常時・イベント時を通じてその生物動態を評価予測しうる基盤の整備が望まれている。すなわち、生物多様性および生態系の保全・再生を有効に実現するには、生物生息場としての地盤環境の適切な理解とこれに立脚した科学技術体系が重要不可欠である。4章と5章では、イベント過程を踏まえた沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発に資することを目的として、高波・台風イベントによる砂浜及び干潟生物動態・分布を、地盤環境動態・適合場の観点から調査しその適用性を検証^{32),40)-43)}している。

6章では、2章で新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートと飽和・不飽和浸透流解析手法を組み合わせた沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築し³⁴⁾、高波・台風イベントによる砂浜及び干潟地形変化に伴う各種底生生物の生息分布変化を予測し、当該プラットフォームの有効性を検証している。

7章では、本研究で得られた主な知見とその有効性についてまとめている。

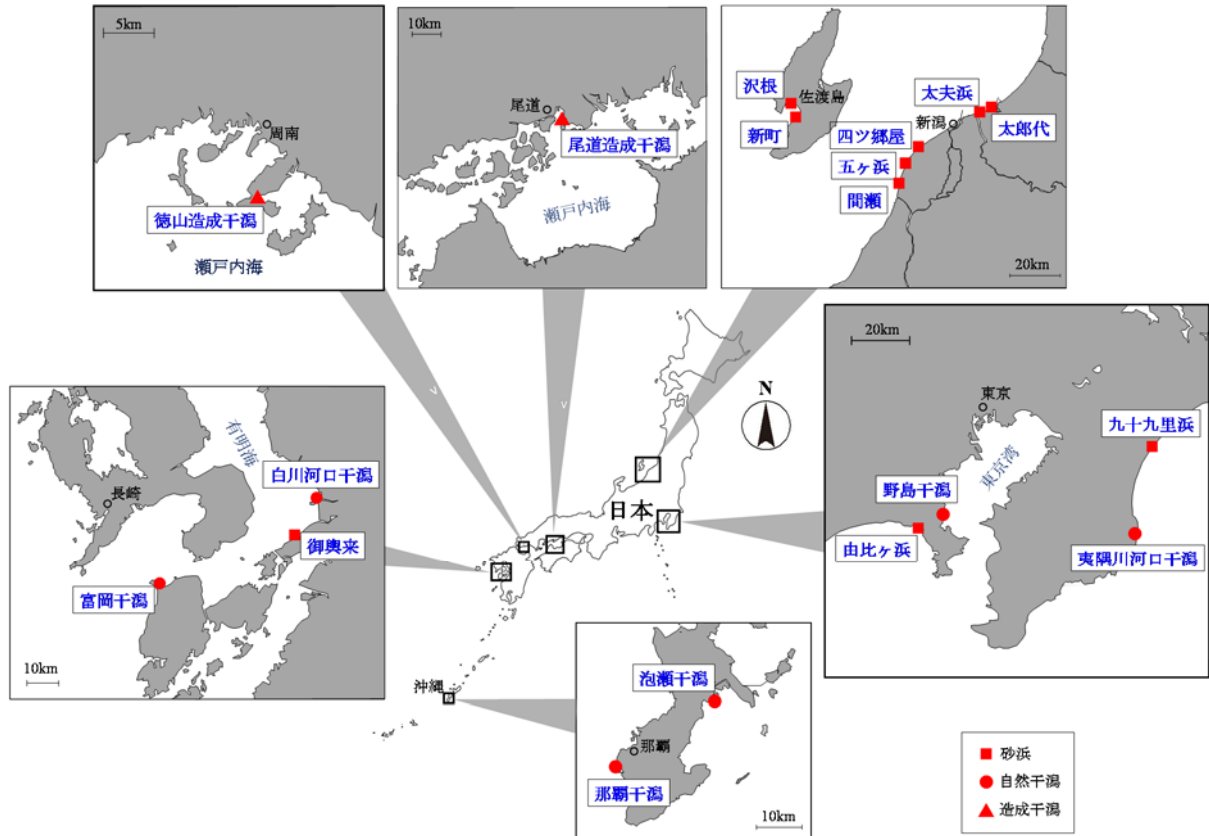


図-2.1 現地調査を行った日本各地の砂浜及び自然・造成干潟

2. 多種多様な生物住環境診断チャートの拡張

2.1 はじめに

本章では、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態を統合的に評価予測しうる沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測技術の柱の一つとして、筆者らが開発した既往の生物住環境診断チャートに砂浜の潮間帯及び潮上帯に生息する小型底生甲殻類に対する既往の研究結果を加え、当該チャートを新たに拡張した。そして、拡充・発展した生物住環境診断チャートを考察し、その有効性について述べる。

2.2 干潟・砂浜の土砂環境変化に果たすサクシジョンの役割

本節では、干潟及び砂浜における表層土砂環境、即ち、土砂の間隙中、水が占めている割合を表す飽和度 S_r 、土砂の緩密を表す相対密度 D_r 、土砂の硬さを表すベンセン断強度 τ^* の変化に果たすサクシジョン s の役割、そして、2009年

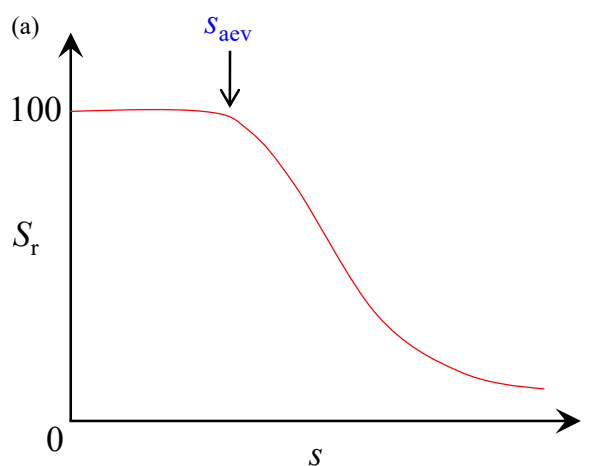
表-2.1 現地調査を行った砂浜及び自然・造成干潟の特性

砂 浜	中央粒径 D_{50} (mm)	Traskの 淘汰係数	前浜勾配	F_c^a (%)
四ツ郷屋	0.176-0.209	1.253-1.338	1/13	0.01-0.06
太郎代	0.228-0.3	1.300-1.391	1/11	0-0.08
太夫浜	0.325-0.368	1.192-1.300	1/6	0-0.03
太夫浜-東	0.355	1.207	1/8	0.04
沢根	0.171-0.207	1.256-1.597	1/6	0-0.17
新町	0.191-0.389	1.253-1.732	1/6	0.02-0.06
五ヶ浜(2011/11)	0.249	1.386	1/14	0.08
五ヶ浜(2016/10)	0.182-0.236	1.237-1.402	1/30	0.02-0.14
間瀬	0.324-0.380	1.21-1.336	1/14	0-0.01
九十九里浜	0.174-0.179	1.24-1.25	1/34	0.08-0.36
由比ヶ浜	0.17-0.174	1.280-1.316	1/32	0.25-0.48
御輿来	0.14-0.293	1.249-2.094	1/8 ^b , 1/323 ^c	0.55-21.98

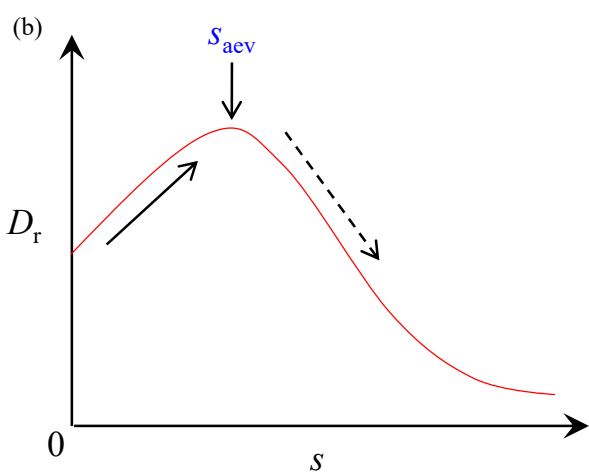
自然干潟	中央粒径 D_{50} (mm)	Traskの 淘汰係数	岸沖勾配	F_c^a (%)
夷隅川河口干潟	0.347-0.355	1.385-1.422	1/35	0.23-6.38
那覇干潟	0.202-0.783	1.299-1.799	1/188	0-1.01
泡瀬干潟	0.25-0.301	1.446-1.509		0.11-0.59
野島干潟	0.17-0.21	1.268-1.539	1/93	0.43-2.58
白川河口干潟	0.138-0.274	1.378-1.836	1/150	0.48-26.03
富岡干潟	0.19-0.311	1.166-2.864	1/240	0.01-2

造成干潟	中央粒径 D_{50} (mm)	Traskの 淘汰係数	岸沖勾配	F_c^a (%)
尾道 ⁴³⁾	Max. 0.8		1/50	1.07-89.13
徳山	0.111-0.391	1.340-1.700	1/64	0.06-39.63

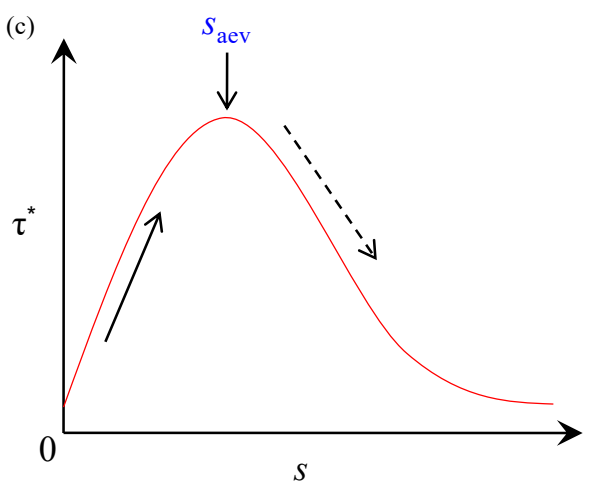
^a 細粒分の含有率, ^b 満潮位斜面部の勾配, ^c テラス部の勾配



(a) 飽和度



(b) 相対密度



(c) ベーンセン断強度

図-2.2 干潟・砂浜の土砂環境変化に果たすサクシジョンの役割を表す概念モデル

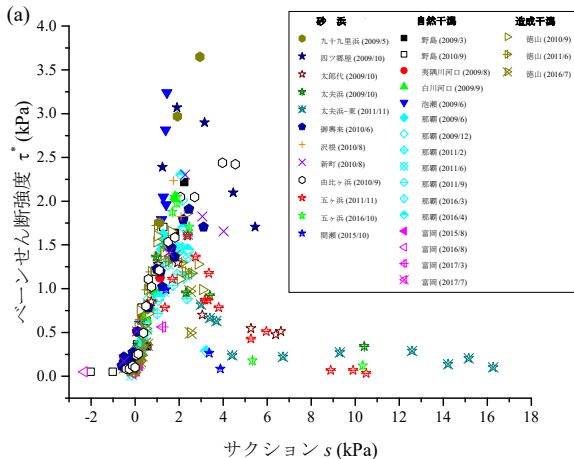
から2017年にかけて、底質及び地形の特性が互いに異なる(表-2.1)日本各地の砂浜及び自然・造成干潟(図-2.1)で行った現地調査から得られた表層土砂のサクシジョンとベーンセン断強度の関係について述べる。この際、サクシジョン s は次式で定義される。

$$s = u_a - u_w \tag{1}$$

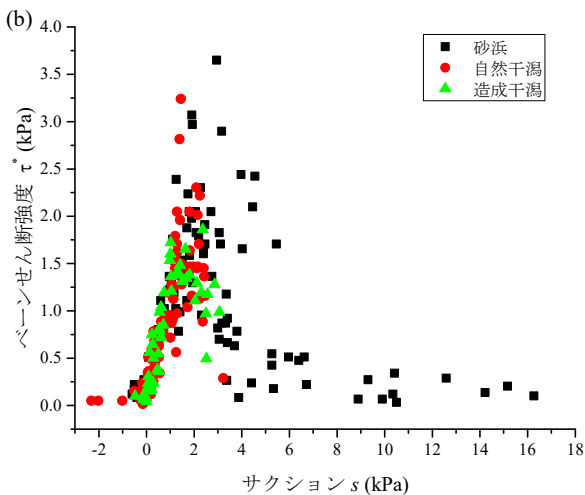
ここに、 u_a は大気圧、 u_w は間隙水圧である。本定義により、サクシジョンは地下水位でゼロとなる。

一般に、干潟で発達するサクシジョンは、干潟の殆どの領域で、空気侵入サクシジョン値 s_{aev} より低いため、土中水分が常に保持される実質飽和域($S_r \approx 100\%$)である一方、砂浜では、実質飽和域とサクシジョンが空気侵入サクシジョン値より高い不飽和帯が形成されることが特徴である(31), 36), 42), 43), 45), 46)。

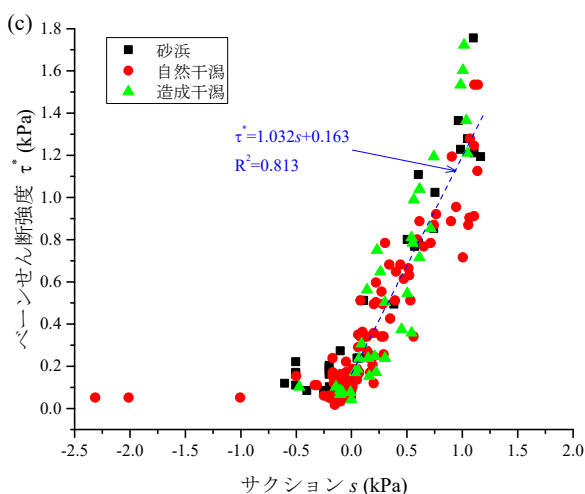
干潟及び砂浜における表層土砂の不攪乱サンプリング及び室内試験によって得られた表層土砂の飽和度、相対密度及びベーンセン断強度とサクシジョンの関係(31), 36), 42), 43)を一般化した概念モデルを図-2.2に示す。図-2.2(a)によると、サクシジョンが空気侵入サクシジョン値より低い実質飽和域($S_r \approx 100\%$)とサクシジョンが空気侵入サクシジョン値より高い不飽和域が形成されていることが分かる。 $s \leq s_{aev}$ の実質飽和域では、サクシジョンが増加するにつれて、サクシジョン動態による繰返し弾塑性収縮現象(22)に伴って間隙比が減少し、それに対応する相対密度は顕著に増加する(図-2.2(b))。そして、土砂の高密度化ならびにサクシジョンの上昇によって、ベーンセン断強度も顕著に増加していく(図-2.2(c))。一方、 $s > s_{aev}$ の不飽和域では、サクシジョンのさらなる増加に伴う飽和度の低下とともに、サクシジョン動態による繰返し収縮効果が弱くなるため、相対密度、ベーンセン断強度ともに著しく低下している(図-2.2(b), 図-2.2(c))。このように、干潟及び砂浜の土砂環境変化は、空気侵入サクシジョン値を基準としたサクシジョンによって支配されている。図-2.3に示すように、日本各地の砂浜及び自然・造成干潟(図-2.1)で大潮の最干潮時に岸沖測線に沿って計測された表層土砂のサクシジョンとベーンセン断強度(ベーンブレードの高さ:10 mm, 直径:40 mm, 厚さ:0.5 mm)の間



(a) 現地調査を行った17箇所の砂浜及び自然・造成干潟におけるサクシオンとベーンせん断強度の関係



(b) 砂浜、自然干潟及び造成干潟に分けて示したサクシオンとベーンせん断強度の関係



(c) 1.2 kPa以下のサクシオンとベーンせん断強度の関係

図-2.3 現地調査を行った砂浜及び自然・造成干潟におけるサクシオンとベーンせん断強度の関係

は、上述のような関係にあることが確認できる。具体的に、自然・造成干潟では、高くても 3 kPa 前後のサクシオンが発達している一方、砂浜では、自然・造成干潟より高くサクシオンが発達する場が存在していることが分かる(図-2.3(b))。そして、サクシオンが 0 ~ 1.2 kPa の実質飽和域では、砂浜及び自然・造成干潟の違いに関わらず、そして、底質・地形の違いに関わらず、サクシオンとベーンせん断強度の間には強い相関を持つ線形関係があることが分かる(図-2.3(c))。

2.3 拡充・発展した生物住環境診断チャートと考察

干潟底生生物の住活動の適合・限界場の相互関係を統一的に表す既往の生物住環境診断チャート(24, 47, 48)に砂浜の潮間帯及び潮上帯に生息する小型底生甲殻類であるナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシに対する既往の研究結果(31)を加えると共に、干潟及び砂浜の地盤環境動態の統合分析結果(図-2.3(c))をふまえ、当該チャートを新たに拡張した(図-2.4)。拡充・発展した生物住環境診断チャートは、干潟及び砂浜底生生物の住活動の限界場の相互関係を統一的に表している(図-2.4)。当該チャートに基づくサクシオンを核とした地盤環境動態と生物種の多様性の間の密接な関係(図-2.5(a))は、造成干潟における現地調査結果から得られたサクシオンと底生生物種類の関係(図-2.5(b))とその特性がよく整合している。

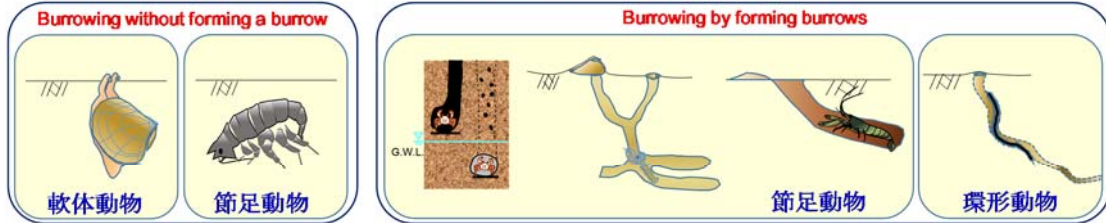
2.4 まとめ

本章では、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態を統合的に評価予測しうる沿岸底生生態-地盤環境動態統合評価予測技術の柱の一つとして、筆者らが開発した既往の生物住環境診断チャートを新たに拡張した。拡充・発展した多種多様な生物住環境診断チャートに基づくサクシオンを核とした地盤環境動態と生物種の多様性の間の密接な関係は、造成干潟における現地調査結果とよく整合することを明らかにした。



コマツキガニ テップウエビ ニホンスナモグリ ヒメスナホリムシヒゲナガトビムシ アサリ フジノハナガイ チロリ ゴカイ

多様な生物住活動



CR	環形動物		節足動物							軟体動物		
	ゴカイ	チロリ	コマツキガニ	スナモグリ	テップウエビ	ナミノリソコエビ	ヒメスナホリムシ	ヒゲナガハマトビムシ	アサリ	シオフキ	フジノハナガイ	
	<i>Ceratonereis erythraensis</i>	<i>Glycera nicobarica</i>	<i>Scopimera globosa</i>	<i>Nihonotrypaea japonica</i>	<i>Alpheus brevicristatus</i>	<i>Haustorioides japonicus</i>	<i>Excrolana chiltoni</i>	<i>Trinorchestia trinitatis</i>	<i>Ruditapes philippinarum</i>	<i>Macra veneriformis</i>	<i>Donax semigranosus</i>	
▲	◆	✕	■	▼	●	▶	◀	●	★	◀		

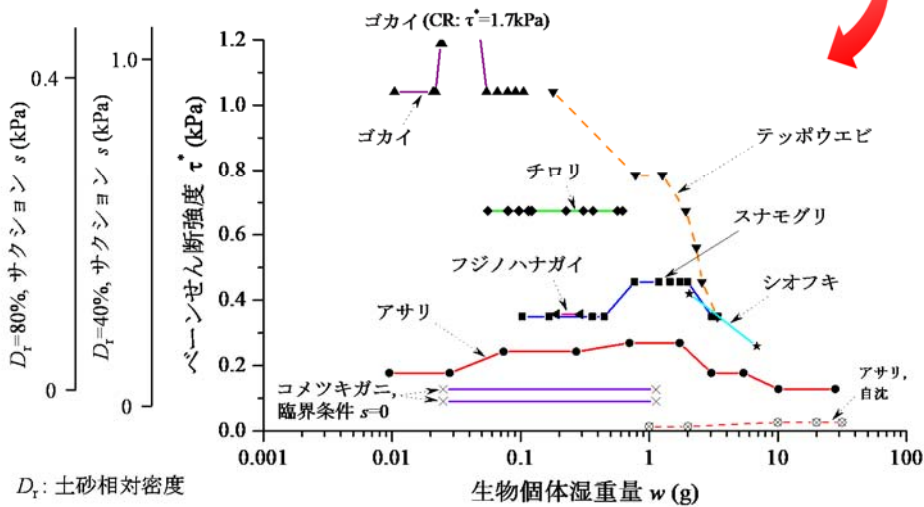
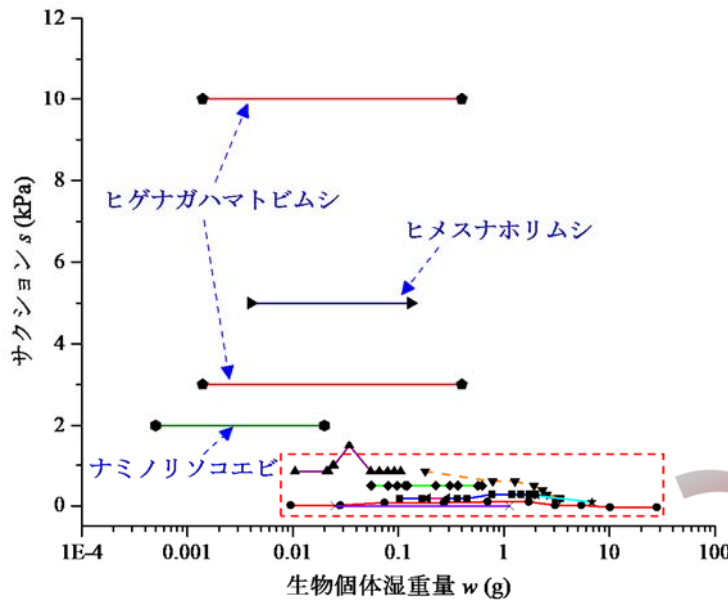
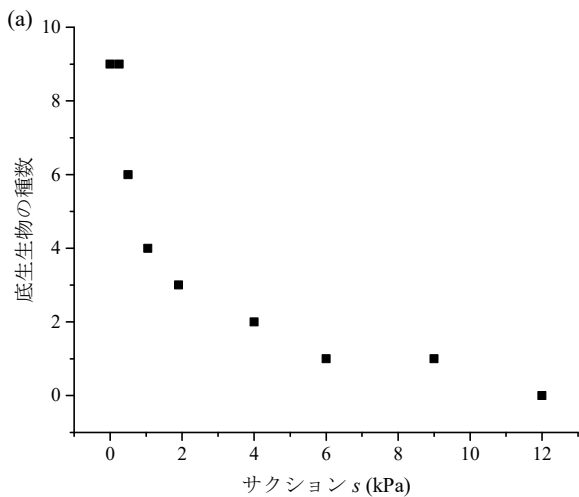
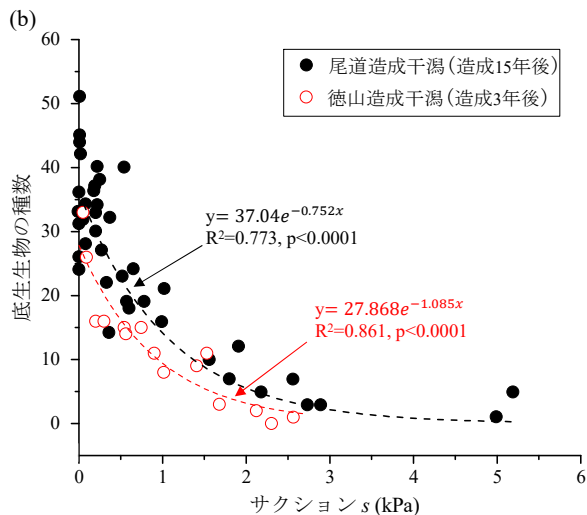


図-2.4 拡充・発展した多種多様な生物住環境診断チャートと底生生物間の地盤環境限界場の相互関係



(a) 拡充・発展した生物住環境診断チャートに基づくサクシオンと底生生物種の多様性の関係



(b) 造成干潟におけるサクシオンと底生生物種の多様性の関係²⁵⁾

図-2.5 サクシオンと底生生物種の多様性の関係

3. 潮差が大きく異なる砂浜潮間帯に生息する底生端脚類・等脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性

3.1 はじめに

砂浜に生息する各種の小型甲殻類は、海浜の掃除屋として美しい砂浜を保つとともに、多種多様な鳥類及び魚類の餌資源生物として重要な役割を担っている⁴⁹⁾⁻⁵²⁾。このよう

な砂浜の生態系は、砂浜環境を特徴づける波・潮位・底質の粒径といった3つの主因⁵³⁾⁻⁵⁵⁾に関連して主に研究されてきており、その種の多様性や生物量は、地盤上の波や流れ等の水理過程及び地形動態に制御されることが知られている⁵³⁾⁻⁶²⁾。一方、砂浜生物の多くは地盤中に生息するにも関わらず、土砂内部の物理動態の果たす役割については従来理解が乏しく留まっていた背景があった。

このような背景から、筆者らが推進している生態地盤学の知見を砂浜へ展開することにより、従来は不明であった砂浜底生生物の生息分布に果たす規定要因・指標を明らかにしている。具体的に、波の遡上に伴う土砂内部の水分張力を表すサクシオンの動態が、日本の砂浜に生息する小型底生端脚・等脚類の代表種であるナミノリソコエビ (*Haustorioides japonicus*) とヒメスナホリムシ (*Excirrolana chiltoni*) の分布域を制御していることが現地調査及び室内実験による検証を通じて明らかになっている^{31), 63)}。

ナミノリソコエビとヒメスナホリムシは、砂浜潮間帯の表面に浅く埋れし^{31), 50), 64), 65)}、それぞれの同属近縁種が北西太平洋と全世界中の砂浜に分布していることが知られている^{55), 66)-70)}。特に、ナミノリソコエビは黄海沿岸に生息する同属近縁種と近い遺伝子構造を持っていることが明らかになっている⁷¹⁾。

一方、ナミノリソコエビ種とヒメスナホリムシの潮位変動に伴う当該生物分布の移動に関するいくつかの研究によると、Kaneko and Omori (2003)は、潮位の変動に伴ってナミノリソコエビは砂浜の岸沖方向に移動し、ヒメスナホリムシは移動しないと報告しており⁵⁰⁾、Yu et al. (2002)は、ナミノリソコエビの近縁種である *H. koreanus* は潮位の変動に伴う有意な移動が確認できなかったことを報告している⁷²⁾。しかし、彼らは、上述の底生生物の潮位変動に伴う移動の有無に関する理由については明らかにしていない。実際、砂浜では、潮位の変動によって、地下水位は岸沖方向に変動し、それに伴ってサクシオンの分布も変動する。このようなサクシオン分布の変動によって、上述の底生生物は、潮位の変動に伴って砂浜の岸沖方向に移動する可能性が考えられる。

本章では、潮差が大きく異なる砂浜潮間帯に生息するナミノリソコエビとその近縁種を含む4種の小型底生端脚類

及び小型底生等脚類であるヒメスナホリムシを対象とし、当該生物の生息密度とサクシヨンの関係において共通的な地盤環境適合場の存在の有無、又、潮位変動による地下水位変動に伴うサクシヨンの変動と当該底生生物の岸沖分布の関係を明らかにすることを目的とし、現地調査を行った。更に、新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートの当該生物に対する地盤環境適合場の検証を行った。

3.2 土砂物理環境と底生生物分布の一体調査

本研究では、2009年から2019年にかけて、日本と韓国に各々位置し潮差が大きく異なる新潟県沿岸の五つの海浜（調査日の潮差の平均：0.25 m）、北海道の斜里海浜（調査日の潮差：0.46 m）、福岡県の津屋崎海浜（調査日の潮差：1.81 m）、韓国全羅南道新智島のミョンサシムニ海浜（調査日の潮差：2.69 m）及び韓国済州道のサムヤン海浜（調査日の潮差：2.81 m）で現地調査を行った（図-3.1、表-3.1、表-3.2）。

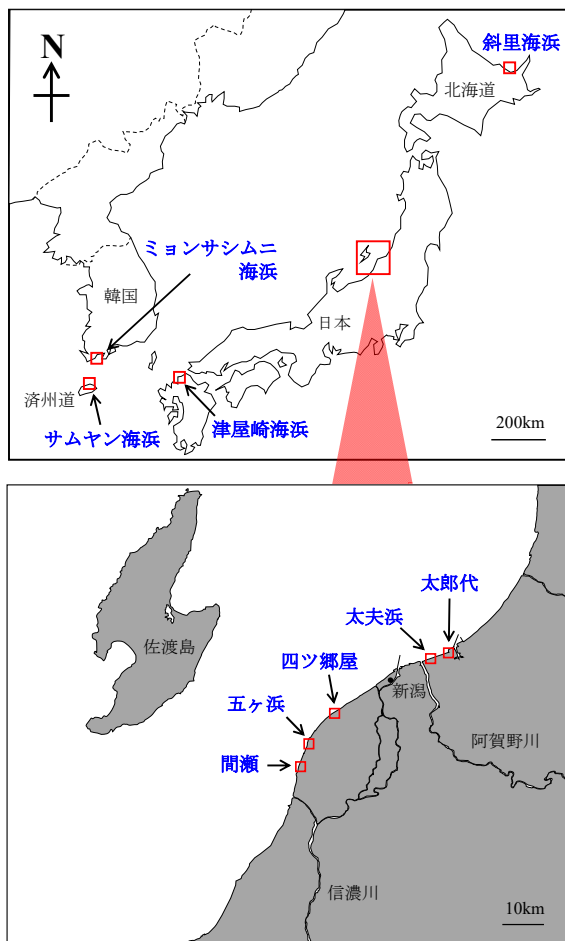


図-3.1 現地調査を行った日本と韓国の海浜

具体的な調査内容は、次のとおりである。潮差が最も小さい新潟県沿岸の五つの海浜（四ツ郷屋：2009年10月、2010年10月、2011年10月；太郎代：2009年10月、2011年10月；太夫浜：2009年10月；間瀬：2015年10月、2015年11月；五ヶ浜：2016年9月、2016年10月）では大潮の干潮時に、斜里海浜（2017年9月）では大潮の満潮時と干潮時に、潮差が比較的に大きい津屋崎海浜（2018年6月）、ミョンサシムニ海浜（2019年6月）及びサムヤン海浜（2017年5月）では、大潮の満潮時から干潮時の間で約2時間又は3時間ごとに調査を行った。砂浜ごとに岸沖方向に設けた測線に沿って、1~5 m 間隔に設定した各地点のサクシヨン s 、地下水位、表層土砂サンプルリング（内径：60 mm；深さ：50 mm）、底質の硬さを表すベーンせん断強度 τ^* などの土砂物理環境と底生生物分布の一体調査を実施した。

砂浜表層土砂の不攪乱サンプルに対して、各種の室内試験を行い、土砂の粒度分布、含水比 w (%), 土粒子比重 G_s 、間隙比 e 、相対密度 D_r (%) 及び飽和度 S_r (%) を得た。この際、土砂の緩密状態を表す相対密度は式(2)、土砂の間隙中の水が占めている割合を表す飽和度は式(3)で定義される⁷³⁾。

$$D_r(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (2)$$

$$S_r(\%) = \frac{G_s w}{e} \quad (3)$$

ここに、 e_{max} は土砂の最緩状態を表す最大間隙比、 e_{min} は土砂の最密状態を表す最小間隙比である。それゆえ、相対密度は砂質土の緩密状態を統一的に評価しうる指標となっている⁷³⁾。

一方、土砂の間隙が水で飽和された場合 ($S_r = 100\%$)、含水比と間隙比の間には、式(4)のような関係にある⁷³⁾。

$$w(\%) = \frac{e}{G_s} \times 100 \quad (4)$$

底生生物の生息分布の調査では、上述の土砂物理環境の調査を行った各地点で4つのコアサンプル（直径：100 mm、深さ：100 mm）を採集し、1 mm ふるいにかけた後、ふるい上に残った生物をアルコールで固定後、室内で生物の同定及び計数を行った。

3.3 砂浜の底生生物分布に果たす地盤環境動態の役割

本節では、砂浜表層土砂の地盤環境動態と底生生物の分布に果たすサクシジョンの役割について述べる。

現地調査を行った新潟県沿岸に位置する五つの海浜の特性を表-3.1、その他の海浜、即ち、斜里海浜、津屋崎海浜、

表-3.1 現地調査を行った新潟県沿岸の 5 つの海浜とその特性

砂 浜	中央粒径 D_{50} (mm)	前浜勾配	水温 (°C)	塩分濃度 (psu)	潮差 (m)
四ツ郷屋(2009/10)	0.176 - 0.209	1/13	18.8	34	0.31
四ツ郷屋(2010/10)	0.198 - 0.229	1/8	20.9	32.5	0.25
四ツ郷屋(2011/10)	0.188	1/11	21.1	33.3	0.21
太郎代(2009/10)	0.228 - 0.300	1/11	18.6	31	0.29
太郎代(2011/10)	0.221 - 0.248	1/9	21.3	29.6	0.22
太夫浜(2009/10)	0.325 - 0.368	1/6	18.1	20	0.29
間瀬(2015/10)	0.324 - 0.380	1/14	22.8	29.8	0.2
間瀬(2015/11)		1/7	18.8	31.6	0.2
五ヶ浜(2016/09)		1/8	24.5	21.1	0.24
五ヶ浜(2016/10)	0.182 - 0.236	1/30	22	31.5	0.3

サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜の特性を表-3.2に示す。海浜ごとに底質粒径 (D_{50}) 及び前浜勾配などの砂浜特性が違うことが分かる(表-3.1, 表-3.2)。新潟県沿岸に位置する海浜において(表-3.1)、五ヶ浜(2016年10月)の前浜勾配は、その他の五つの海浜の前浜勾配より緩いことが読み取

表-3.2 現地調査を行った新潟県沿岸以外の 4 つの海浜とその特性

砂 浜	中央粒径 D_{50} (mm)	前浜勾配	水温 (°C)	塩分濃度 (psu)	潮差 (m)
斜里 (2017/09)	0.187 - 0.211	1/26	16.1, 15.8	23.4, 26.8	0.46
津屋崎 (2018/06)	0.117 - 0.123	1/10*, 1/50**	21.7 - 26.1	30.3 - 32.3	1.89
サムヤン (2017/05)	0.187 - 0.331	1/9*, 1/36**	20.6 - 21.6	24.6 - 29.9	2.81
ミョンサシムニ (2019/06)	0.190 - 0.551	1/9*, 1/67**	19.8, 25.7	29.1, 30.4	2.69

*満潮位斜面部の勾配, **テラス部の勾配

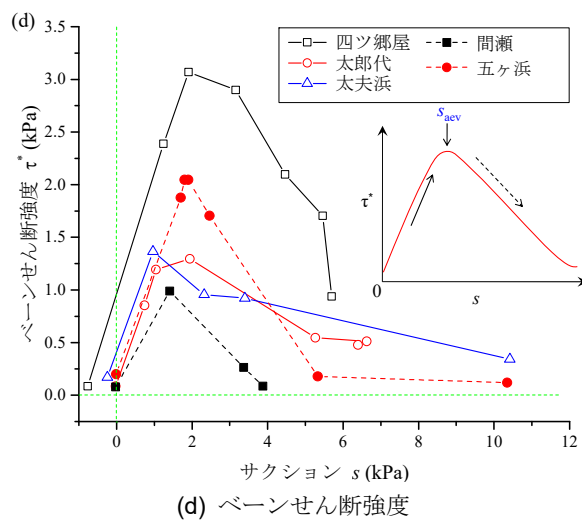
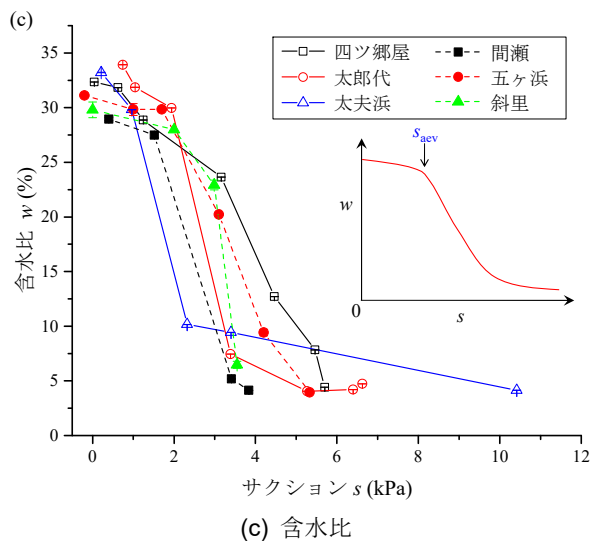
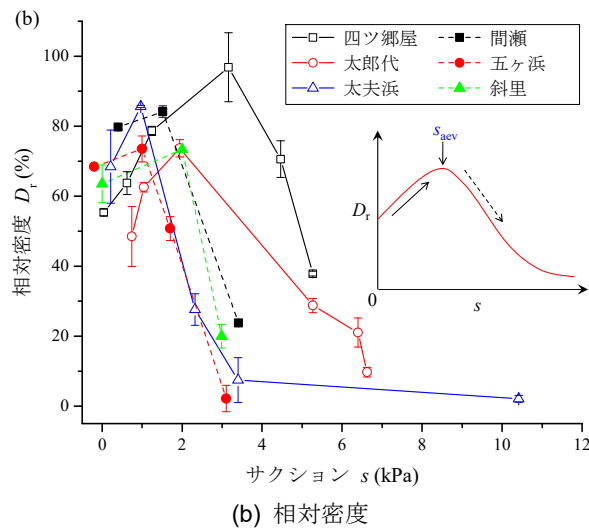
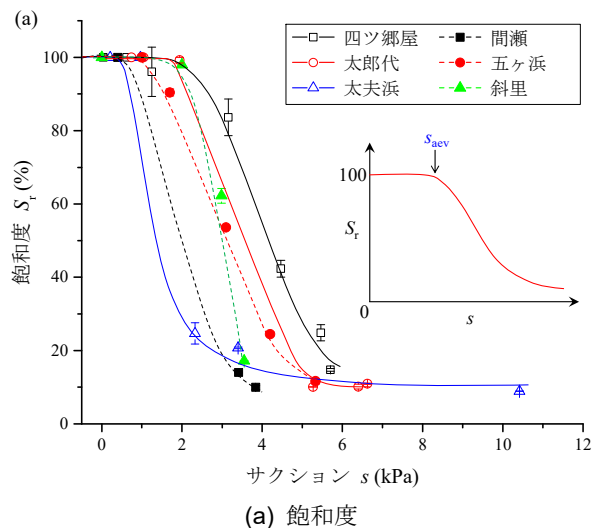


図-3.2 砂浜土砂環境変化に果たすサクシジョンの役割

れる。この際、五ヶ浜(2016年10月)では高波による堆積作用によって、同海浜の一ヶ月前に比べ急激に勾配が緩くなっていた。一方、新潟県沿岸の五つの海浜に比べ潮差が比較的大きい津屋崎海浜、サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜の前浜は、新潟県沿岸の五つの海浜及び斜里海浜と違い、急な勾配を有する満潮位傾斜部と非常に緩やかなテラス部から成っていることが特徴である(表-3.2, 図-3.5(a), 図-3.6(a), 図-3.7(a))。

図-3.1に示す現地調査を行った海浜における表層土砂の飽和度、相対密度、含水比及びベーンせん断強度とサクシジョンの関係を図-3.2に示す。図-3.2によると、全海浜を通じて、サクシジョン s が空気侵入サクシジョン値 s_{aev} より低い実質飽和域($S_f \approx 100\%$)とサクシジョン s が空気侵入サクシジョン値 s_{aev} より高い不飽和域が形成されていることが分かる(図-3.2(a))。具体的には、 $s \leq s_{aev}$ の実質飽和域では、サクシジョンが増加するにつれて、サクシジョン動態による繰返し弾塑性収縮現象²²⁾に伴って間隙比が減少し、それに対応する相対密度は顕著に増加し(図-3.2(b))、含水比は式(4)の関係によって徐々に減少している(図-3.2(c))ことが分かる。そして、土砂の高密度化ならびにサクシジョンの上昇によって、ベーンせん断強度は顕著に増加している(図-3.2(d))。一方、 $s > s_{aev}$ の不飽和域では、サクシジョンのさらなる増加に伴う飽和度の低下とともに、含水比は著しく減少し(図-3.2(c))、サクシジョン動態による繰返し収縮効果が弱くなるため、相対密度、ベーンせん断強度ともに著しく低下している(図-3.2(b), 3.2(d))。実際、飽和度が10%ほどの実質気乾状態になると、相対密度は5%程度と非常に緩い状態となっていることが分かる。このように、砂浜の土砂環境変化は、空気侵入サクシジョン値を基準としたサクシジョンによって支配されている。

潮差が小さい日本海沿岸に位置する砂浜(表-3.1)の潮間帯及び潮上帯に生息する典型的な3種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシの分布に果たすサクシジョンの役割について述べる。新潟県沿岸に位置する五つの砂浜で行った現地調査から得られた、上述の3種の小型甲殻類分布とサクシジョンの関係を図-3.3に示す。各種生物の分布限界が、ナミノリソコエビでは、サクシジョン2 kPa、ヒメスナホリムシでは、サクシ

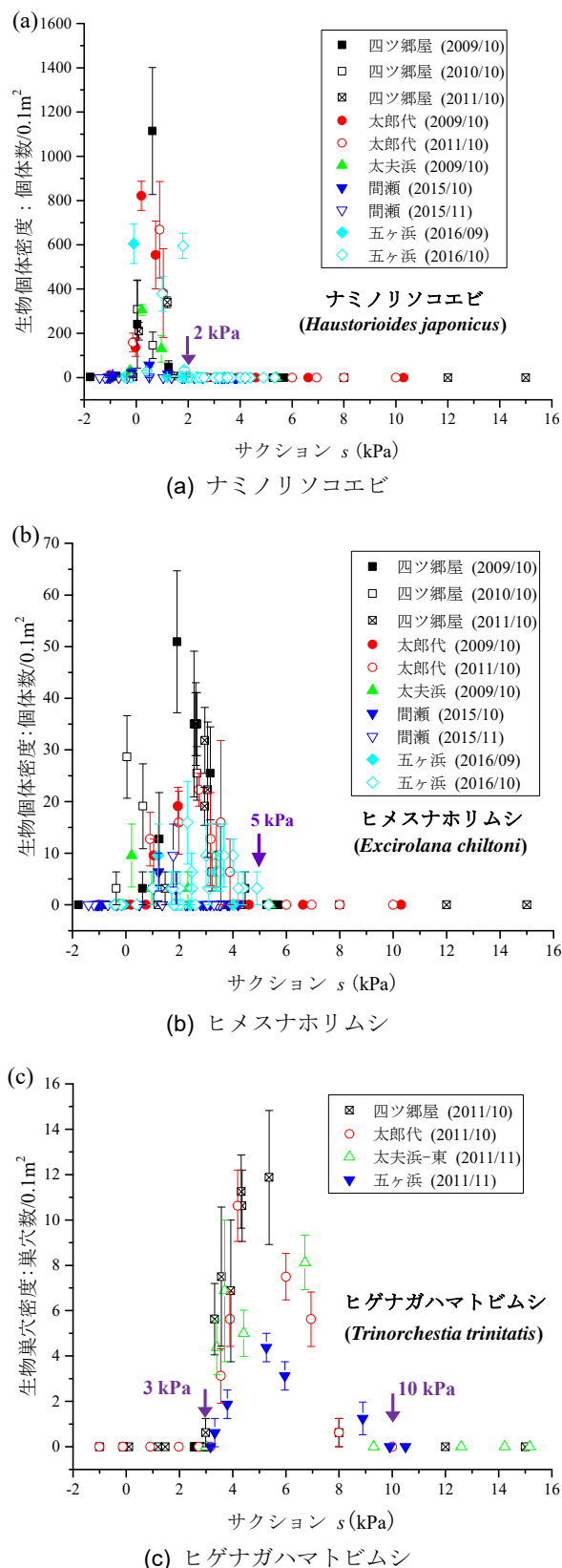


図-3.3 潮差が小さい新潟県沿岸の5つ海浜における3種の小型甲殻類の生物密度(平均値±SE)とサクシジョンの関係

ン5 kPa, ヒゲナガハマトビムシでは, サクシオン3 kPaと10 kPaとなっていることが分かる。

このような砂浜底生生物分布の制御機構は, 室内実験による検証を通じて明らかとなっており, 各種生物のサクシオンによる異なる3つの分布制御機構が得られている³¹⁾。即ち, ナミノリソコエビの分布限界であるサクシオン2 kPaでは, サクシオン動態による繰返し弾塑性収縮とそれに伴う土砂の高密度化並びに強度増加によって, 潜砂が不可となる。ヒメスナホリムシは, 分布限界のサクシオン5 kPaで潜砂は問題なく可能である。一方, 同生物は土砂内部で水呼吸を行うため⁶⁶⁾, 飽和度 $S_r = 10 \sim 20\%$ の水を吸引する必要がある。しかし, サクシオンがある一定値(5 kPa)を超えると, 水の吸引が阻害され呼吸不能となり死亡する。ヒゲナガハマトビムシの沖側の分布限界であるサクシオン3 kPaでは, ナミノリソコエビと同様のメカニズムで潜砂不可となる。ヒゲナガハマトビムシの岸側の分布限界であるサクシ

ン10 kPaでは, サクシオンが過大になることによって, 土粒子に水が吸着し土砂の実効粘着力が消失するため, 巣穴を形成することが出来なくなる。

3.4 底生端脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性

本節では, 新潟県沿岸に比べ潮差が大きい日韓の砂浜(表-3.2)の潮間帯に生息する小型底生端脚類であるナミノリソコエビとその近縁種の生息分布, そして, 潮位の低下に伴う当該生物の岸沖分布変化に果たすメカニズムについて, サクシオンを核とした地盤環境適合場の観点から検証する。

新潟県沿岸の五つの海浜に比べ潮差が大きい斜里海浜, 津屋崎海浜, サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜の岸沖距離に対する高低差, 並びに, 潮位の低下に伴う地下水位・サクシオンの変化と共に, ナミノリソコエビの生息限界であるサクシオンが2 kPa の場の変化を図-3.4, 図-3.5, 図-3.6及び図-3.7に各々示す。潮位の低下に伴って地下水位は低

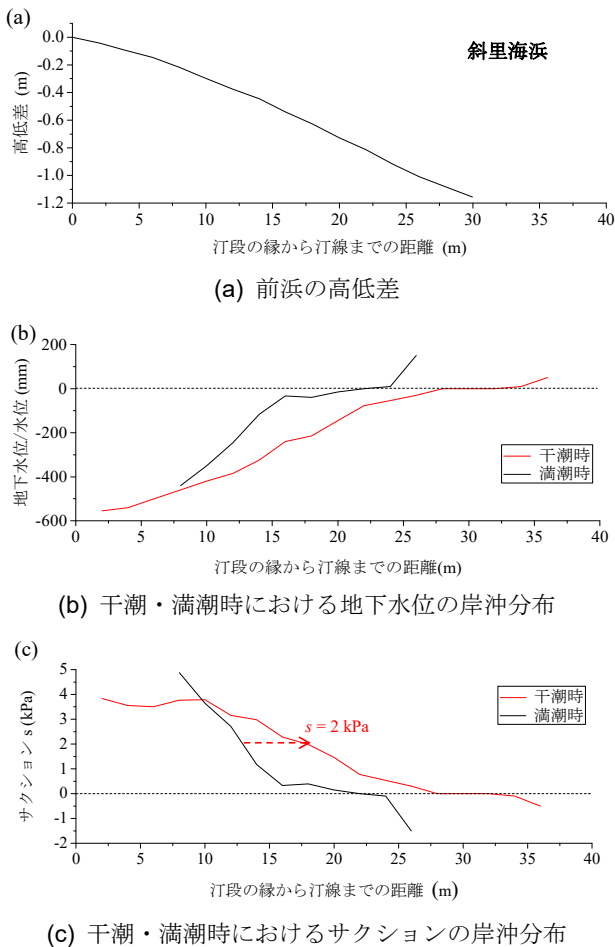


図-3.4 北海道斜里海浜の特性

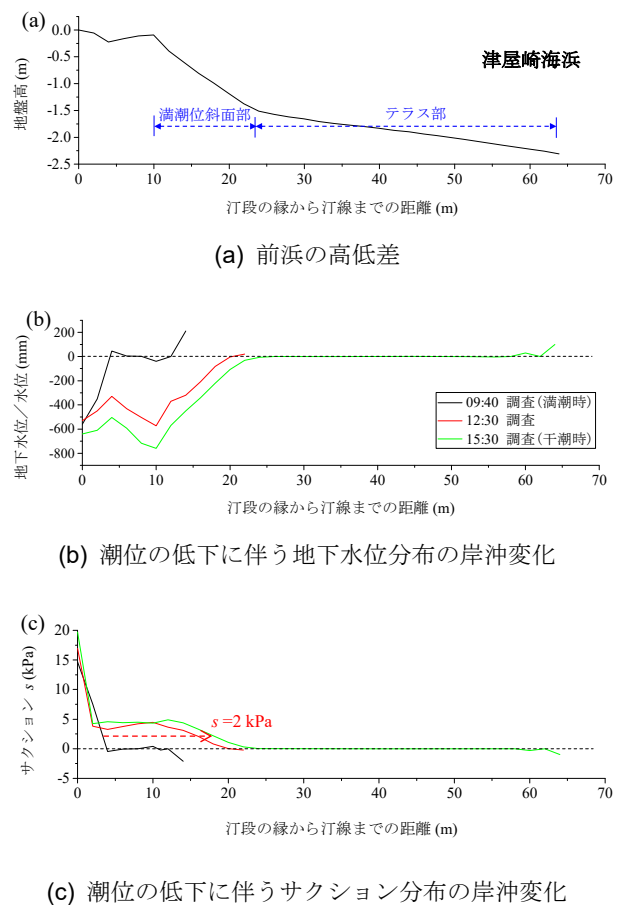
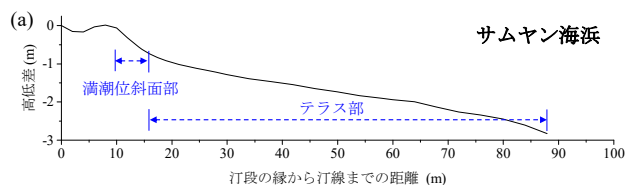
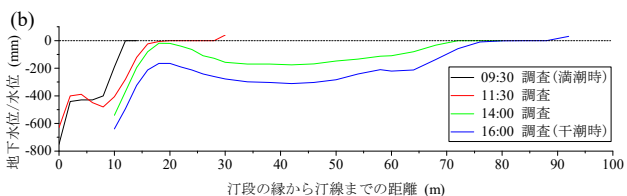


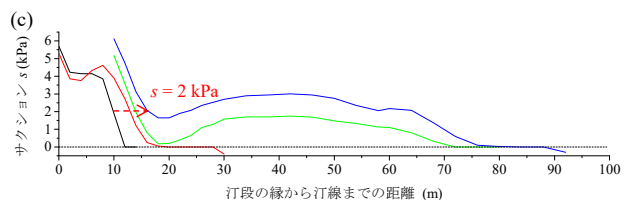
図-3.5 福岡県津屋崎海浜の特性



(a) 前浜の高低差

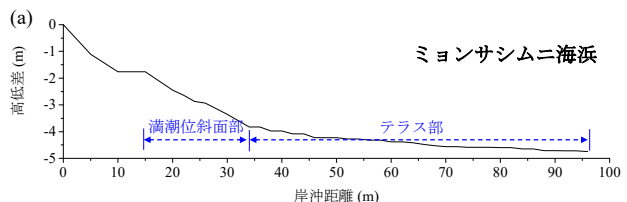


(b) 潮位の低下に伴う地下水水位分布の岸沖変化

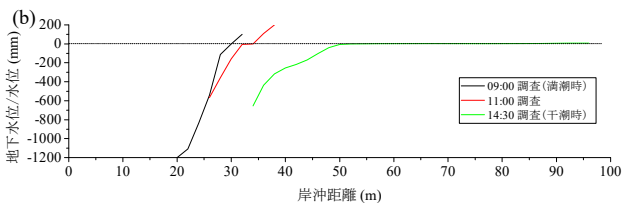


(c) 潮位の低下に伴うサクシオン分布の岸沖変化

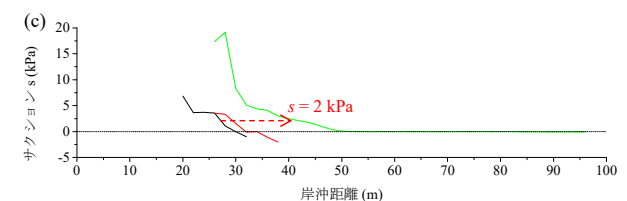
図-3.6 韓国サムヤン海浜の特性



(a) 海浜の高低差



(b) 潮位の低下に伴う地下水水位分布の岸沖変化



(c) 潮位の低下に伴うサクシオン分布の岸沖変化

図-3.7 韓国ミョンサシムニ海浜の特性

下し(図-3.4(b), 図-3.5(b), 図-3.6(b), 図-3.7(b)), それに伴ってサクシオンは増加しており(図-3.4(c), 図-3.5(c), 図-3.6(c), 図-3.7(c)), ナミノリソコエビの生息限界場であるサクシオンが 2 kPa の場合は沖側に移動していることが分かる.

斜里海浜, 津屋崎海浜, サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜における潮位変動に伴うナミノリソコエビ及びその近縁種の岸沖生物分布を図-3.8, 図-3.9, 図-3.10, 図-3.11に各々示す. 斜里海浜に生息するキタナミノリソコエビ(*H. munsterhjelmii*), 津屋崎海浜のナミノリソコエビ(*H. japonicus*)及びミョンサシムニ海浜の *H. nesogenes* の生物密度は, サムヤン海浜とミョンサシムニ海浜に生息する *H. koreanus* の生物密度に比べ約 100 倍高い. 特にミョンサシムニ海浜では 2 種のナミノリソコエビの近縁種(*H. koreanus*

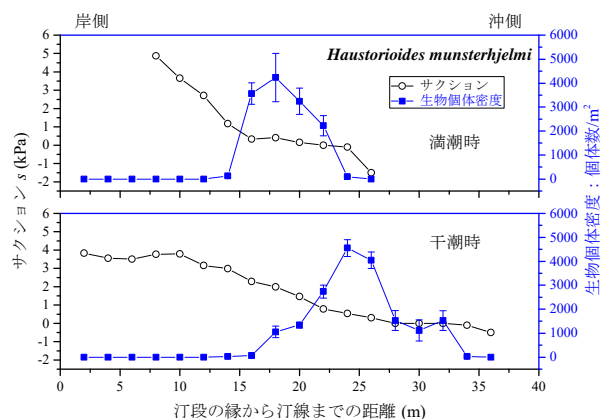


図-3.8 北海道斜里海浜における潮位変動に伴うキタナミノリソコエビ(*H. munsterhjelmii*) 密度(平均値±SE)の岸沖分布変化

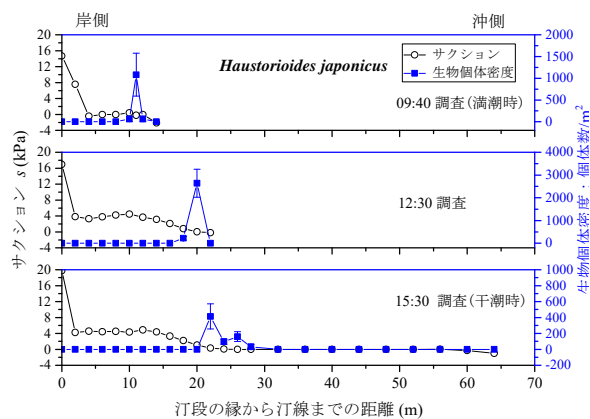


図-3.9 福岡県津屋崎海浜における潮位変動に伴うナミノリソコエビ(*H. japonicus*) 密度(平均値±SE)の岸沖分布変化

と *H. nesogenes*) が生息しており、共通の生息場 (図-3.11 : 岸沖距離が約 40-50 m の範囲) を有していることが特徴である。

日本の斜里・津屋崎海浜では、満潮位から潮位の低下に伴って、キタナミノリソコエビとナミノリソコエビ生物分布のピークが沖側へ移動していることが分かる (図-3.8, 図-3.9)。具体的に、斜里海浜のキタナミノリソコエビ生物分布のピークは、満潮時の岸沖距離が 17 m の所から干潮時には 25 m の所まで約 8 m 沖側へ移動 (図-3.8) ; 津屋崎海浜でのナミノリソコエビ生物分布のピークは、満潮時の岸沖距離が 12 m の所から干潮時には 22 m の所まで約 10 m 沖側へ移動していることが読み取れる (図-3.9)。そして、ナミノリソコエビの地盤環境適合場であるサクシオンが 0~2 kPa の領域は、斜里海浜では、満潮時の岸沖距離が約 13-25 m から干潮時には約 17 - 33 m へ沖向きに移動しており (図-3.4(c), 図-3.8), 津屋崎海浜においては、満潮時の岸沖距離が約 4 - 14 m から干潮時には約 18 - 64 m へ沖向きに移動している (図- 3.5(c), 図-3.9)。これに対応して、キタナミノリソコエビとナミノリソコエビ生物分布が潮位の低下に伴って沖側へ移動していることと定量的に整合している。

一方、韓国のサムヤン海浜に生息するナミノリソコエビの近縁種 (*H. koreanus*) においては、潮位の低下に伴う当該生物分布の沖側への明瞭な移動が見えないことが分かる (図-3.10)。そして、韓国のミョンサシムニ海浜におけるナミノリソコエビの近縁種 (*H. koreanus* と *H. nesogenes*) の場合 (図-3.11), 潮位の干潮時のみ当該生物の生息分布が確認

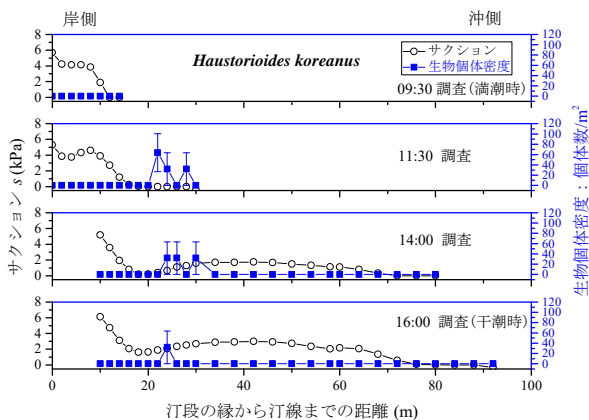


図-3.10 韓国サムヤン海浜における潮位変動に伴う *H. koreanus* 密度 (平均値 ± SE) の岸沖分布変化

できる。満潮時の当該領域のデータは深い水深のため無いものの、岸側領域において当該生物の生息分布が確認できないことから、潮位の低下に伴う当該生物の沖側への移動は無いと考えられる。又、韓国のサムヤン・ミョンサシムニ海浜に生息するナミノリソコエビの近縁種 (*H. koreanus* と *H. nesogenes*) は、共通的に干潮時のナミノリソコエビの地盤環境適合場であるサクシオンが 0~2 kPa の領域に分布していることが分かる (図-3.10, 図-3.11)。これらの理由として、*H. koreanus* と *H. nesogenes* にとって、潮差が大きく平坦な長いテラス部を有するサムヤン・ミョンサシムニ海浜は干潟といえ、潮差が小さい海浜に比べて移動に必要な距離が非常に長くなり、それに伴うエネルギー消費及び被食のリスクも高くなると考えられる。なお、潮位の変動に伴う *H. koreanus* の密度分布に有意な変化がないことは、過去にも報告⁷²⁾されているが、その定量的な成因については分かって

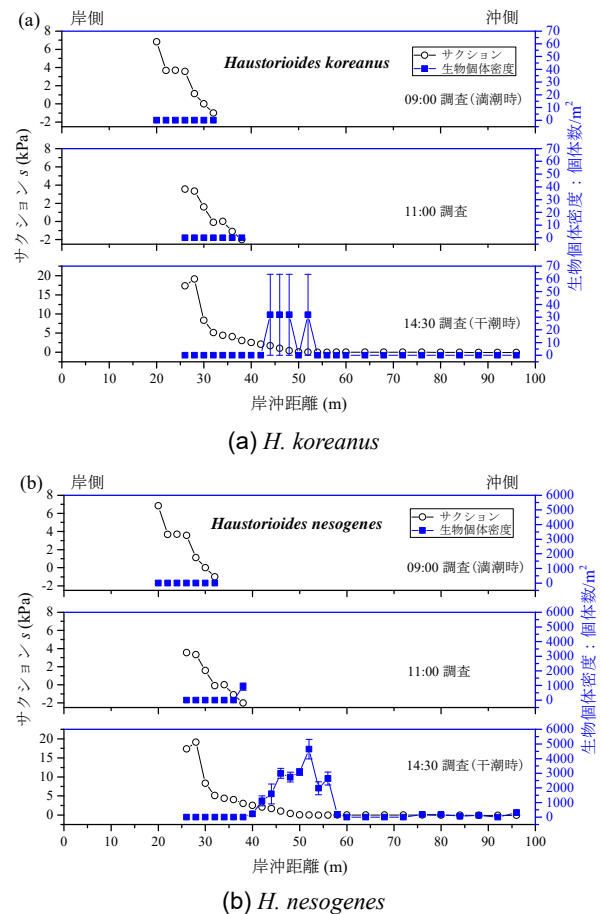


図-3.11 韓国ミョンサシムニ海浜における潮位変動に伴うナミノリソコエビの近縁種密度 (平均値 ± SE) の岸沖分布変化

いなかった。

新潟県沿岸に比べ潮差が大きい日韓の砂浜潮間帯に生息するナミノリソコエビ(*H. japonicus*)とその近縁種であるキタナミノリソコエビ(*H. munsterhjelmii*), *H. koreanus* 及び *H. nesogenes* の生物密度とサクシジョンの関係を図-3.12に示す。ナミノリソコエビの近縁種の生息域は、ナミノリソコエビの分布限界と同様に、砂浜と潮差の違い及び潮位の変動によらず、サクシジョンが約 2 kPa 以下の場で共通して現れている。

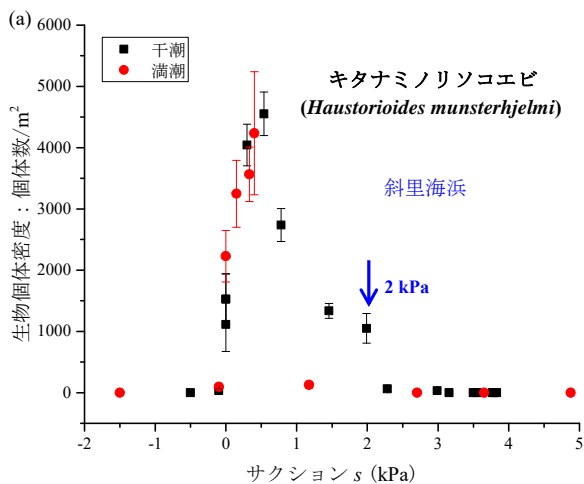
3.5 底生等脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性

本節では、新潟県沿岸に比べ潮差が大きい日韓の砂浜潮間帯に生息する小型底生等脚類であるヒメスナホリムシの

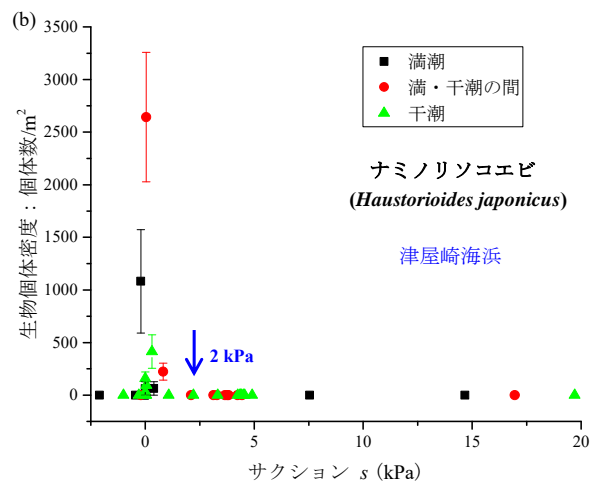
生息分布、そして、潮位の低下に伴う当該生物の岸沖分布変化に果たすメカニズムについて、サクシジョンを核とした地盤環境適合場の観点から検証する。

ヒメスナホリムシが生息し、新潟県沿岸に位置する五つの海浜に比べ潮差が大きい津屋崎海浜、サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜における岸沖距離に対して、潮位の低下に伴うサクシジョンの変動を図-3.13に各々示す。潮位の低下に伴って、サクシジョンが増加し、ヒメスナホリムシの生息限界であるサクシジョンが 5 kPa の場合は沖側に移動していることが分かる。

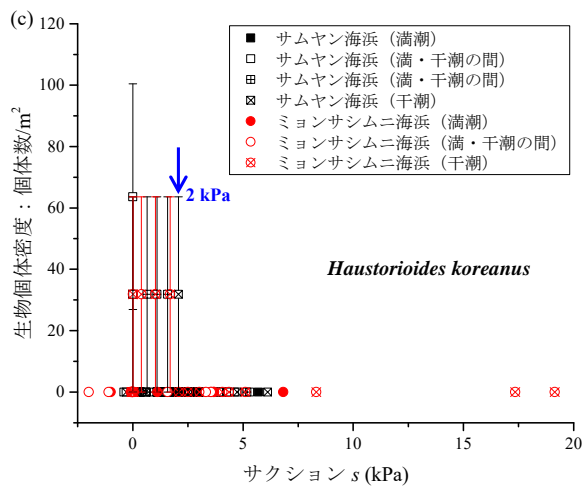
津屋崎海浜、サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜における潮位の低下に伴うヒメスナホリムシの岸沖分布の変化を図-3.14に各々示す。満潮時に見られる当該生物密度の明



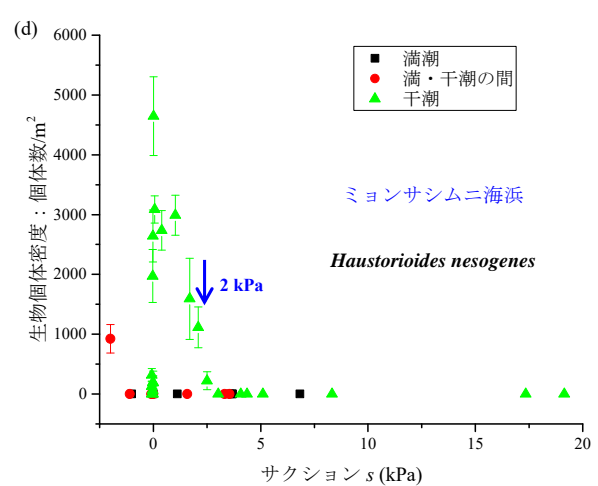
(a) キタナミノリソコエビ (*H. munsterhjelmii*)



(b) ナミノリソコエビ (*H. japonicus*)



(c) *H. koreanus*



(d) *H. nesogenes*

図-3.12 新潟県沿岸に比べ潮差が大きい砂浜の潮間帯に生息するナミノリソコエビとその近縁種の生物密度(平均値±SE)とサクシジョンの関係

瞭なピークが、潮位の低下に伴って、沖側に移動し干潮時には見えないことから、当該生物の分布領域は沖側に移動又は拡散していると考えられる。具体的に、津屋崎海浜（図-3.14(a)）においては、満潮時の満潮位斜面の上部の狭い範囲に限られた当該生物の分布領域は、干潮時にはテラスの上部まで拡散；サムヤン海浜（図-3.14(b)）では、満潮時の満潮位斜面の上部に位置する当該生物の分布領域は、干潮時にはテラスの下部まで拡散；ミョンサシムニ海浜（図-3.14(c)）では、満潮時の満潮位斜面の下部に位置する当該生物の分布領域は、干潮時にはテラスの上部へ移動している。そして、津屋崎・サムヤン海浜において、満潮時に当該生物の生息が確認できる満潮位斜面の上部では、潮位の低下に伴ってサクシオンが 5 kPa に達する又はそれ以上になっており（図-3.13(a), 図-3.13(b)），それに応じて、当該生物の岸側の分布限界はサクシオンが 5 kPa 以内となる沖側に数 m 移動している（図-3.14(a), 図-3.14(b)）。一方、ミョンサシムニ海岸においては、当該生物の生息限界であるサクシオンが 5 kPa の場合は、潮位の低下に伴って、満潮時の岸沖距

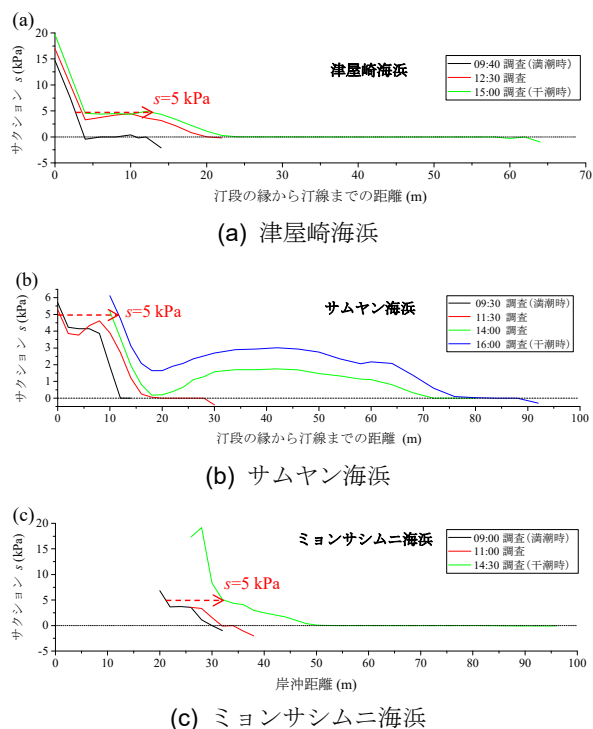


図-3.13 ヒメスナホリムシが生息する潮差が大きい 3 つの海浜における潮位の低下に伴うサクシオンの変化

離約 22 m の地点から干潮時には約 32 m の地点に約 10 m 沖側へ移動しており（図-3.13(c)），当該生物の岸側の分布限界も沖側に約 8 m 移動している（図-3.14(c)）。津屋崎海浜，サムヤン海浜及びミョンサシムニ海浜における潮位の変動に伴うヒメスナホリムシの生息密度とサクシオンの関係を図-3.15 に各々示す。潮差が大きい海浜に生息している当該生物の分布限界も、潮差が小さい新潟県沿岸の五つの海浜と同様に、砂浜の違いによらず、サクシオンが約 5 kPa の場で共通して現れている。又、潮位の変動に関わらず、サクシオンが約 5 kPa の地盤環境場で共通的に当該生物の分布限界が現れていることが分かる。

3.6 まとめ

本章では、日本と韓国に位置し潮差が大きく異なる砂浜の潮間帯に生息するナミノリソコエビとその近縁種を含む

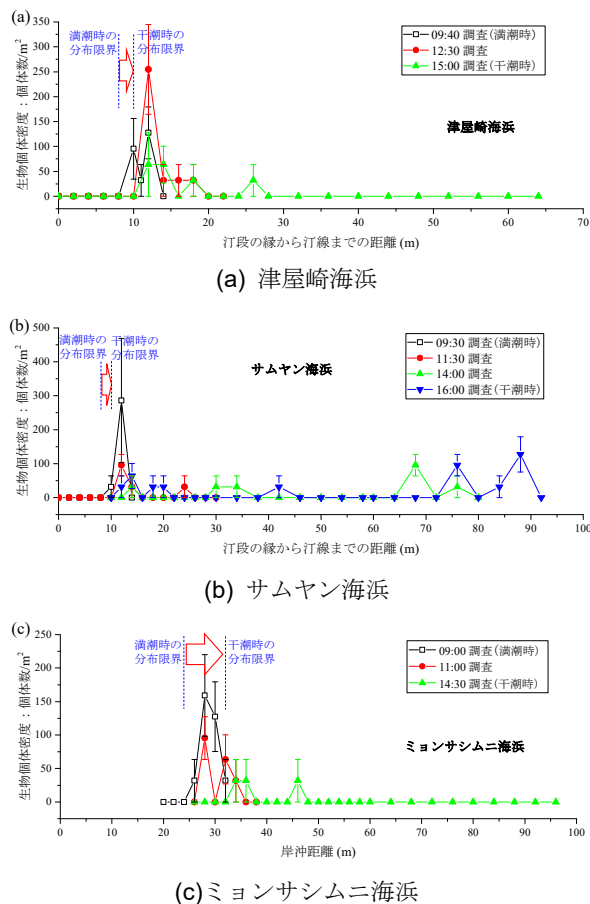
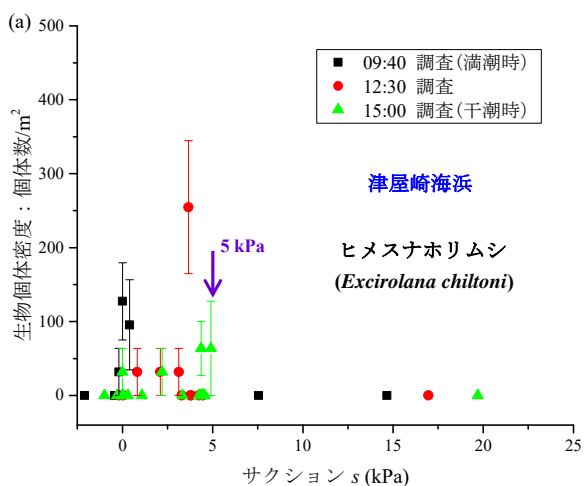
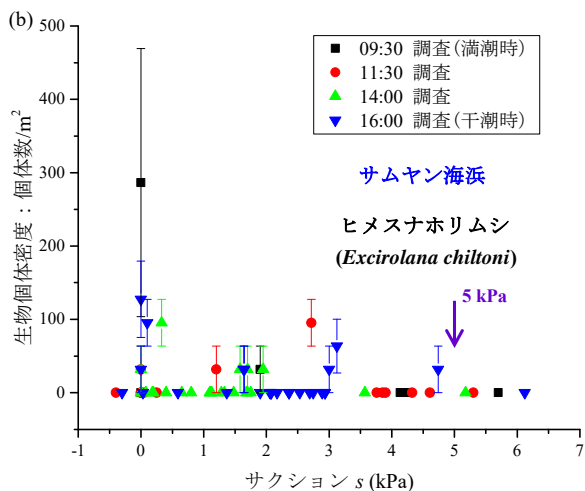


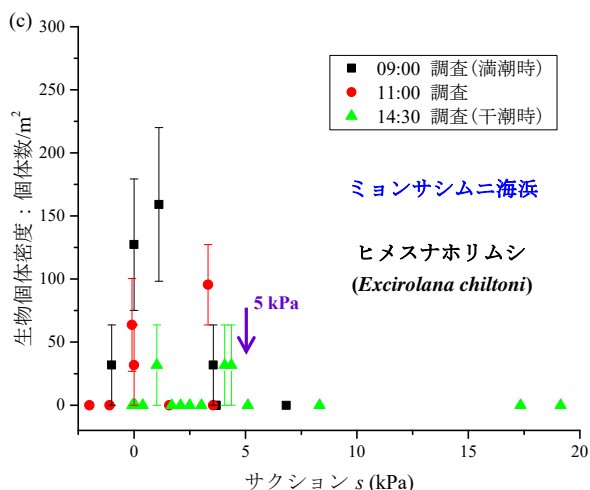
図-3.14 潮差が大きい 3 つの海浜における潮位変動に伴うヒメスナホリムシ密度（平均値 ± SE）の岸沖分布変化



(a) 津屋崎海浜



(b) サムヤン海浜



(c) ミョンサシムニ海浜

図-3.15 潮差が大きい3つの海浜のヒメスナホリムシ密度(平均値±SE)とサクシオンの関係

4種の小型底生端脚類及び小型底生等脚類であるヒメスナホリムシの生物分布とサクシオンの関係において、共通的な地盤環境適合場の存在の有無を明らかにすることを目的とし、現地調査及び統計分析を行った。その結果、当該端脚・等脚類の生物分布とサクシオンの関係において、砂浜と潮差の違い及び潮位の変動に関わらず、共通的な地盤環境適合場が存在することを明らかにした。更に、新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートの当該底生生物に対する地盤環境適合場とよく対応していることが分かった。

4. 高波イベントによる砂浜地形変化に伴う底生生物の生息分布変化と地盤環境適合場の検証

4.1 はじめに

台風等のイベントが、沿岸の地形及び底質の変化を引き起こし^{74)–78)}、沿岸生物生態系にも強い影響を及ぼしていることがよく知られている^{79)–86)}。そして、イベントによる沿岸生態系への影響に関しては、イベント前後の生物の種数、密度、及び種組成の変化に関連して主に研究されてきている。

日本海の沿岸では、11月頃より季節風による高波イベントが多く発生することが特徴であり、当該イベントによる砂浜地形の顕著な変化及び砂浜に生息する多様な生物の密度への影響については知られているが^{87)–89)}、イベントによる生物分布への影響については課題となっている。

本章では、イベント過程を踏まえた沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、高波イベントによる砂浜底生生物動態・分布を、地盤環境動態・適合場の観点から調査しその適用性を検証する。具体的には、日本海沿岸に位置する砂浜の潮間帯及び潮上帯に生息する典型的な3種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシを対象とし、高波イベントによる砂浜地形の大変化に伴う生物生息分布の変化とその要因に対するメカニズムを明らかにすることを目的とし、現地調査及び統計分析を行った。以下では、本調査内容と砂浜の底生生物分布に果たす地盤環境動態の役

割を述べた後、砂浜地形変化による底生生物分布の変化と地盤環境適合場の役割について検証する。

4.2 土砂物理環境と底生生物分布の一体調査

新潟県沿岸に位置する間瀬及び五ヶ浜海浜(図-3.1)で、日本海沿岸の海浜で優占している3種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシを対象とし、季節風による高波イベントによる地形変化前後において、大潮干潮時に当該生物密度・岸沖分布と地盤環境動態の一体調査を行った。具体的には、現地における高波イベント前の事前調査は2015年10月(間瀬海浜)と2016年9月(五ヶ浜海浜)に実施し、イベント後の現地調査は、高波イベントによる小型底生甲殻類分布への直接的な影響を避けるために、イベントの終了から7日後(間瀬海浜：2015年11月；五ヶ浜海浜：2016年10月と11月)に行った。又、高波イベントによる砂浜地形変化に伴う表層土砂の物理環境変化に関する現地調査(両海浜：2018年10月、2019年3月、2019年4月)を合わせて行った。

具体的な調査内容は、次のとおりである。砂浜ごとに岸沖方向に設けた測線に沿って、1~2m 間隔に設定した各地点のサクシオン s 、地下水位、底質の硬さを表すペーンせん断強度 τ^* (ペーンブレードの高さ:10 mm, 直径:40 mm, 厚さ:0.5 mm)の岸沖分布を計測し、各地点の表層土砂の不攪乱サンプリング(深さ50 mm)などの土砂物理環境と底生生物分布の一体調査を実施した。そして、高波イベントに伴う地形・地盤高の変化を、ネットワーク型RTK方式(VRS)によるGNSS測量(Trimble)を通じて評価し、砂浜地形の岸沖変化、それに伴うサクシオンの岸沖分布変化及び各種の生物生息分布を分析した。

砂浜表層土砂の不攪乱サンプルに対して、各種の室内試験を行い、土砂の粒度分布、含水比 w (%)、土粒子比重 G_s 、間隙比 e 、相対密度 D_r (%)及び飽和度 S_r (%)を得た。

各地点の底生生物の生息密度の調査では、ナミノリソコエビとヒメスナホリムシにおいて、4つのコアサンプル(直径:100 mm, 深さ:100 mm)を採集し、1 mm ふるいにかけて後、アルコールで固定し、研究室で生物の同定及び計数を行った。ヒゲナガハマトビムシについては、岸沖調査測線に沿って、測線の両側に10個のコドラート(2 m×2 m)を

設けて、当該生物の巣穴密度を測定した。

さらに、高波イベントによる砂浜地形変化に伴う上述の3種の小型底生甲殻類分布の変化に影響を及ぼす地盤環境(サクシオン、地盤高、岸沖距離、砂浜の勾配)の中で最も予測能力が高い因子を評価するために、統計分析を行った。具体的には、一般化線形モデル(Generalized linear model, GLM)と一般化線形混合モデル(Generalized linear mixed model, GLMM)に、各コアのナミノリソコエビとヒメスナホリムシの個体数及びヒゲナガハマトビムシの巣穴数を適用し分析を行った。この際、GLMとGLMMの双方に対して、上述の地盤環境因子で構成された計37モデルを構築した。そして、これらのモデル間の予測精度の評価指標としてAIC(Akaike Information Criterion)値を比較し、最小のAIC値を示すモデルを各応答変数(各生物の個体数及び巣穴数)に対する最適モデルとして選択した。ヒゲナガハマトビムシの巣穴数に対しては、ポアソン分布(Poisson distribution)を適用し、ナミノリソコエビとヒメスナホリムシの個体数については、個体数分布の右尾が長いこと、負の二項分布(Negative binomial distribution)を採用した。予測変数は、現地調査地(Site)と4つの地盤環境変数、即ち、岸沖距離(Distance)、サクシオン(Suction)、地盤高(Height)、及び砂浜の勾配(Slope)の中の1つである。ここで、砂浜の岸沖距離は、岸側のコンクリート護岸の先端から測定された距離、地盤高は平均海水面から地表面までの高さであり、砂浜の勾配は度単位で測定された勾配である。

計測された地盤環境変数の範囲が、生物の分布範囲の上限と下限の両方を覆っていたため、統計モデルに2次変数(2乗項)を含め、解析前にこれらの地盤環境変数の標準化を行った(平均=0, SD=1)。混合モデルの場合、日付(観測日, Date)は確率変数として扱った。データの多くはゼロ値を含んでいたため、ハードルモデル(Hurdle model)と通常のGLM(M)を使用した。ハードルモデルは2段階モデルであり、ここでは、1段階目ステップの生物個体の有無に対しては二項分布(binomial distribution)を採用し、2段階目ステップでは、生物個体数に対しゼロ切断ポアソン(zero-truncated Poisson)モデルまたはゼロ切断負の二項(zero-truncated negative binomial)モデルを採用した⁹⁰⁾。1段階目ステップでは、地盤環境変数(2乗項を含む)が1つのみ含まれている

一方、2段階目ステップでは、現地調査地(Site)変数が1段階目ステップで使用された地盤環境変数とともに含まれているか、地盤環境変数が含まれていない。これは、生物個体の総数は現地ごとに異なる可能性がある一方、現地内の生息場の選択は、地盤環境変数によって制御されるためである。確率変数である日付(Date)は、1段階目ステップと2段階目ステップのいずれか、または両方のステップに影響を与える可能性があり、それゆえ、通常のGLM、ハードルモデル及びハードル混合モデルを用いて、4つの地盤環境変数のそれぞれに対して分析を行った。帰無(インターセプトのみ)モデルを含めて合計37個のモデルを各応答変数(ナミノリソコエビの個体数、ヒメスナホリムシの個体数、ヒゲナガハマトビムシの巣穴)に適用した(付録A)。GLM(M)分析は、`glmmTMB`⁹¹⁾ パッケージを含むR(3.6.1)⁹²⁾ を用いて行った。

4.3 砂浜地形変化に伴う地盤物理環境の変化

本節では、新潟県沿岸の間瀬海浜及び五ヶ浜海浜における高波イベントによる地形変化とそれに伴う砂浜表層土砂の地盤環境動態に果たすサクシヨンの役割について述べる。

現地調査を行った間瀬海浜と五ヶ浜海浜の特性を表-4.1に示す。間瀬及び五ヶ浜海浜の表層土砂は、普通に分級された細砂から中砂で形成されており、両砂浜における岸沖方向に沿った底質の中央粒径は沖側方向に増加する傾向に

表-4.1 現地調査を行った新潟県沿岸の間瀬海浜と五ヶ浜海浜の特性

砂浜	調査日	中央粒径 D_{50} (mm)	Traskの淘汰係数	前浜勾配	水温 (°C)	塩分濃度 (psu)
間瀬	2015/10/13			1/14	20.1	29.8
	2015/10/14	0.324-0.380	1.210-1.336	1/14	22.8	29.8
	2015/11/18			1/7	17.7	29.7
	2015/11/19			1/7	18.8	31.6
	2018/10/10	0.223-0.433	1.190-1.403	1/17		
	2019/3/24	0.237-0.363	1.270-1.400	1/16		
	2019/4/23	0.226-0.328	1.255-1.399	1/17		
五ヶ浜	2016/9/21			1/8	24.5	21.1
	2016/10/19	0.182-0.236	1.237-1.402	1/30	22	31.5
	2016/11/16			1/32	14.4	31.8
	2018/10/10	0.180-0.240	1.233-1.386	1/23		
	2019/3/23	0.207-0.314	1.260-1.385	1/15		
	2019/4/23	0.202-0.314	1.196-1.389	1/15		

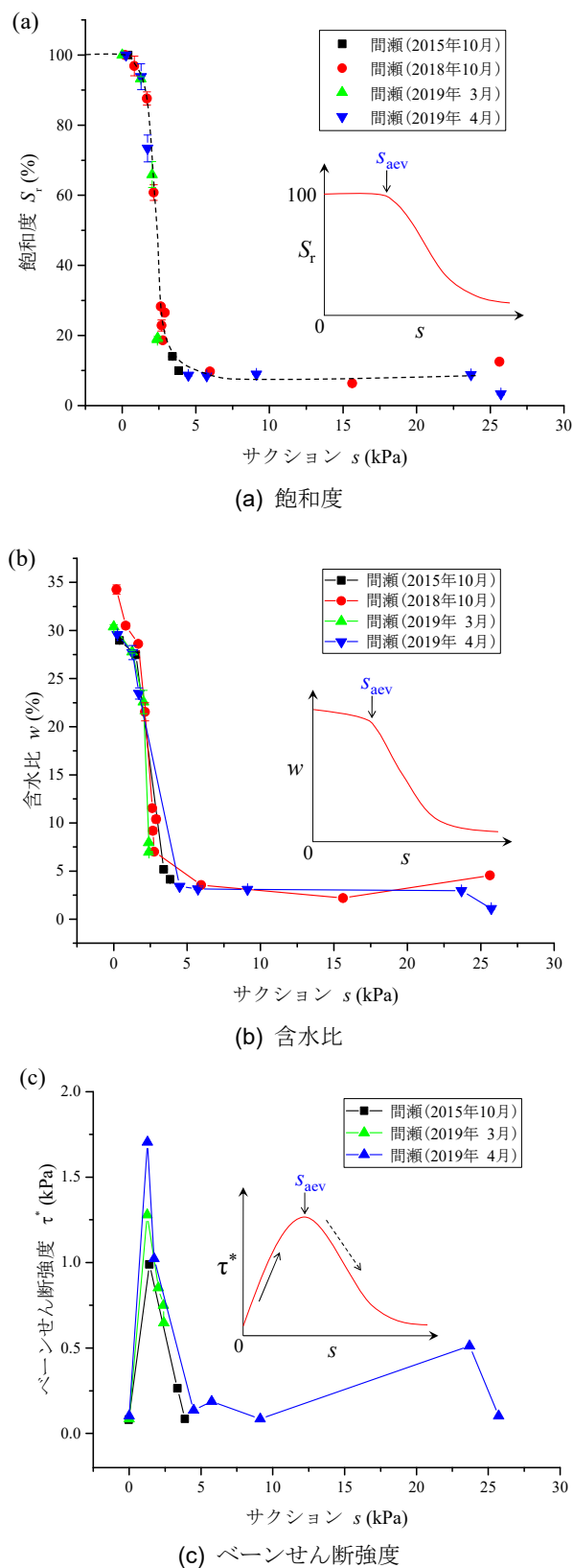


図-4.1 間瀬海浜における高波イベントに伴う表層土砂物理環境の変化

あった。一方、底質の分級度を表す淘汰係数には特定の傾向が見られなかった。

間瀬及び五ヶ浜海浜における高波イベントによる表層土砂の飽和度、含水比、ベーンセン断強度とサクシヨンの関係を図-4.1と図-4.2に各々示す。2章と3章で述べたように、サクシヨン(s)が空気侵入サクシヨン値(s_{aev})より低い実質飽和域($S_r \equiv 100\%$)とサクシヨンが空気侵入サクシヨン値より高い不飽和域が形成されていることが分かる(図-4.1(a), 図-4.2(a))。具体的には、 $s \leq s_{aev}$ の実質飽和域では、サクシヨンが増加するにつれて、サクシヨン動態による繰返し弾塑性収縮現象²²⁾に伴って間隙比が減少し、含水比は式(4)の関係によって徐々に減少している(図-4.1(b), 図-4.2(b))ことが分かる。そして、土砂の高密度化ならびにサクシヨンの上昇によって、ベーンセン断強度は顕著に増加している(図-4.1(c), 図-4.2(c))。一方、 $s > s_{aev}$ の不飽和域では、サクシヨンのさらなる増加に伴う飽和度の低下(図-4.1(a), 図-4.2(a))とともに、含水比は著しく減少し(図-4.1(b), 図-4.2(b))、サクシヨン動態による繰返し収縮効果が弱くなるため、ベーンセン断強度は著しく低下している(図-4.1(c), 図-4.2(c))。このように、砂浜の土砂環境変化は、空気侵入サクシヨン値を基準としたサクシヨンによって支配されていることが確認できる。更に、高波イベントによる砂浜地形の大変化(表-4.1, 図-4.3(a), 図-4.5(a))にも関わらず、サクシヨンに対する表層土砂の物理環境はほとんど変わっていないことが分かる。

以下では、砂浜地形変化による上述の3種の底生生物分布の変化とその要因に対するメカニズムを上述の地盤環境適合場の観点から検証を行う。

4.4 砂浜地形変化に伴う底生生物分布変化

(1) 間瀬海浜

新潟県沿岸に位置する間瀬海浜における高波イベントによる砂浜地形の岸沖変化及びそれに伴うサクシヨンの岸沖分布変化を図-4.3、当該海浜の地形変化に伴う上述の3種の小型底生甲殻類分布の変化を図-4.4に各々示す。当該海浜では、10月には一様勾配であった砂浜斜面が11月の高波イベントによって沖側が侵食すると共に前浜部が大きく

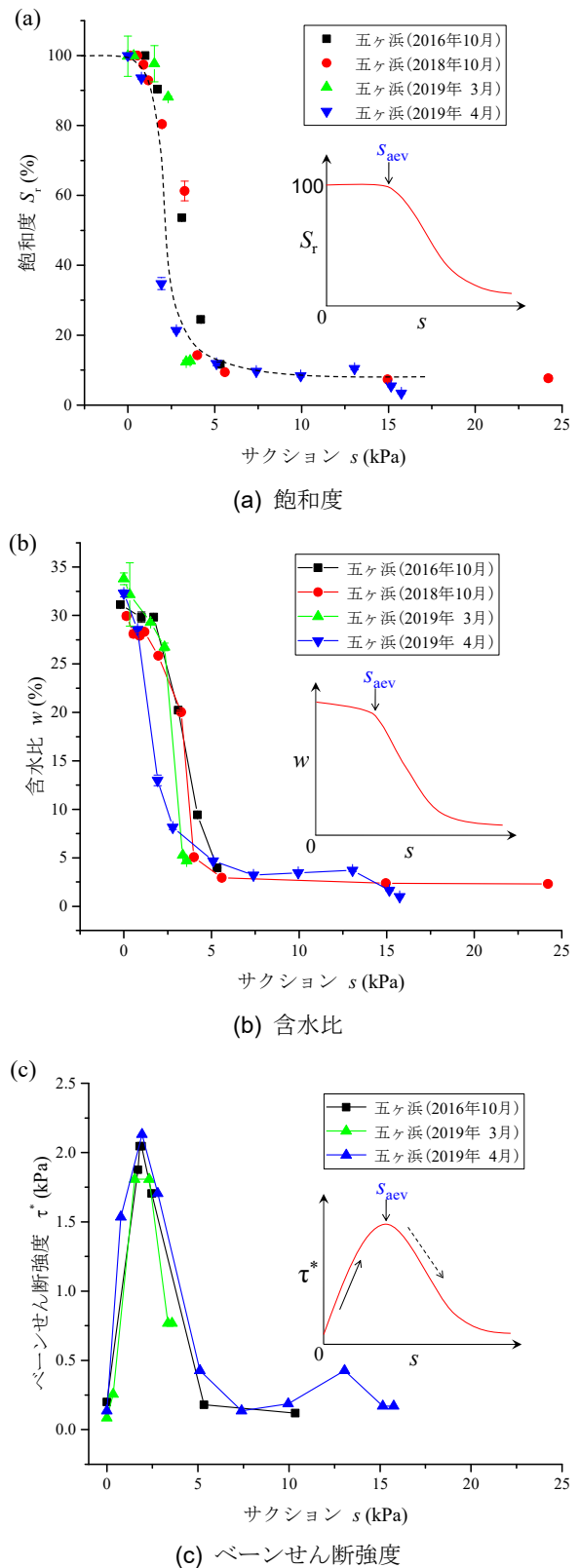
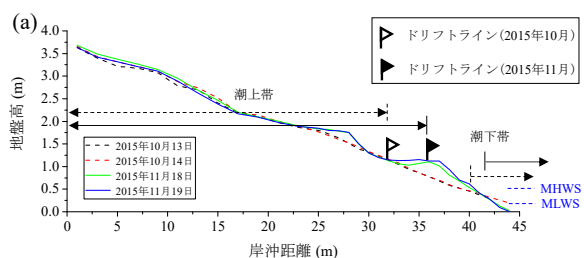
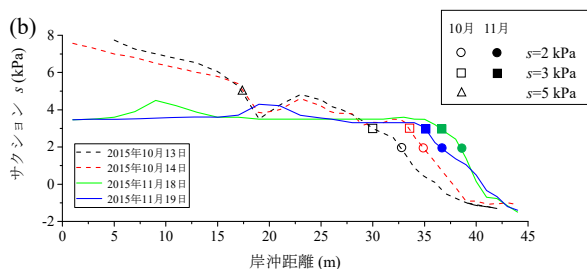


図-4.2 五ヶ浜海浜における高波イベントに伴う表層土砂物理環境の変化

堆積し地形が 2 段に顕著に変化しており(図-4.3(a)), これに伴ってサクシジョンの岸沖分布も大きく変化していることが分かる(図-4.3(b)). このような地形変化に伴う 3 種の小型底生甲殻類の地盤環境適合場の移動もしくは拡大によって, 当該生物の岸沖分布も同様に移動又は拡大している(図-4.4). そして, ナミノリソコエビとヒメスナホリムシは, 当該砂浜の潮間帯に生息しており, ヒゲナガハマトビムシの生息範囲に比べ沖側に生息していることが分かる(図-4.4). 具体的には, 当該砂浜の地形変化後(2015 年 11 月)のナミノリソコエビの適合場であるサクシジョンが 0~2 kPa 発達する領域は, 地形変化前(2015 年 10 月)に比べ沖側に移動しており, 当該生物の生息可能領域は縮まっている(図-4.3(b)). これに対応して, 当該生物は沖側に移動しており, 生息範囲は縮まっている(図-4.4(a)). ヒゲナガハマトビムシの分布域であるサクシジョンが 3~10 kPa の領域は, 地形変化前の 10 月には, 護岸から 30 m の範囲であったのに対し, 地形変化後の 11 月には, 沖側に 5 m 程拡大している(図-4.3(b)). これに対応して, 当該生物の巣穴分布は沖側に 5 m 程延びていることが図-4.4(b)より分かる. 一方, ヒメスナホリムシが生息する砂浜潮間帯における砂浜地形変化前後のサクシジョン変化は, 当該生物の適合場であるサクシジョンが 0~5 kPa の範囲内で変化しており, 当該生物は地形変

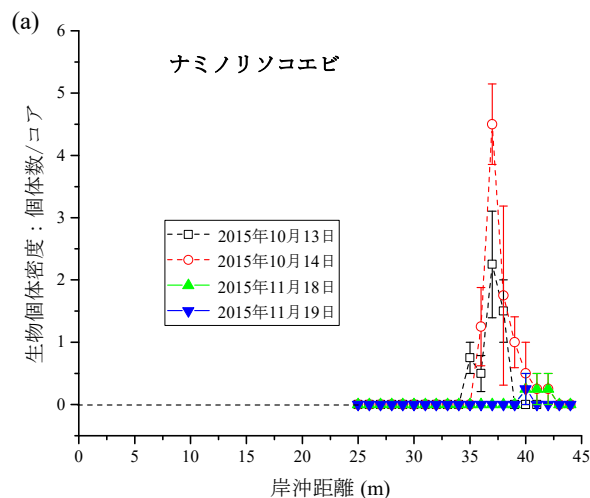


(a) 高波イベントに伴う砂浜の地形変化

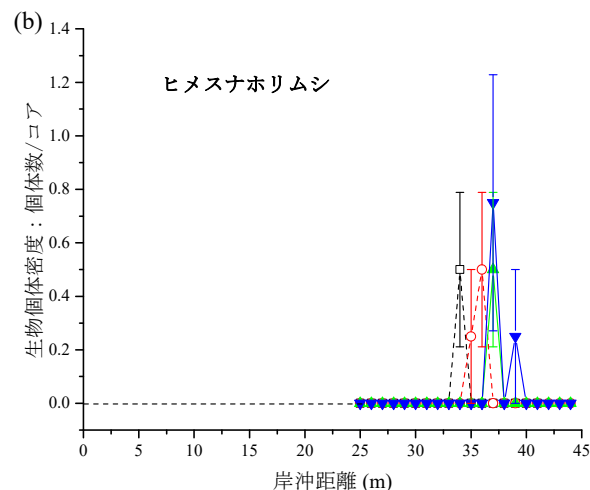


(b) 砂浜地形変化前後のサクシジョンの岸沖分布

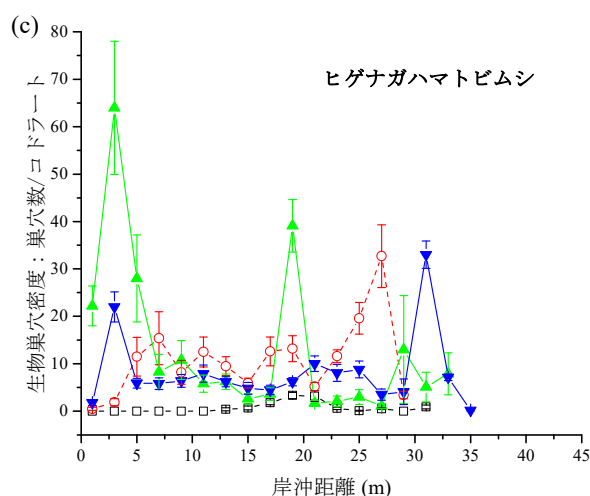
図-4.3 間瀬海浜における高波イベントに伴う砂浜地形とサクシジョンの岸沖分布変化



(a) ナミノリソコエビ



(b) ヒメスナホリムシ



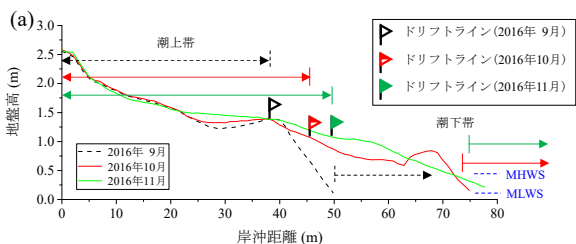
(c) ヒゲナガハマトビムシ

図-4.4 間瀬海浜における砂浜地形変化前後の 3 種の小型甲殻類の生物密度(平均値±SE)の岸沖分布

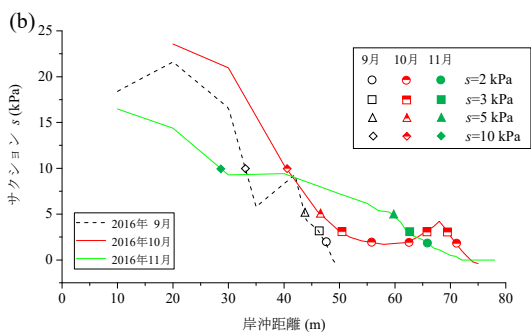
化前(2015年10月)に比べ地形変化後(2015年11月)沖側へ少し移動しているが、他の底生甲殻類に比べ生息分布の変化は殆ど無かった。

(2) 五ヶ浜海浜

新潟県沿岸に位置する五ヶ浜海浜における高波イベントによる砂浜地形の岸沖変化及びそれに伴うサクシヨンの岸沖分布変化を図-4.5, 当該海浜の地形変化に伴う上述の3種の小型底生甲殻類分布の変化を図-4.6 に各々示す。砂浜地形の変化前(2016年9月)の前浜は、急な勾配を有していたが(表-4.1, 図-4.5(a)), 高波イベントによる砂浜地形変化後(2016年10月)の岸沖地形は地形変化前(2016年9月)に比べ、前浜部の沖側に大きく堆積が生じ、砂浜の岸沖距離が沖側に25m程大きく拡大しており、前浜部の地形が顕著に変化していることが分かる(図-4.5(a))。そして、砂浜地形の大変化に伴ってサクシヨンの岸沖分布も全体的に沖側に移動している(図-4.5(b))。具体的には、ナミノリソコエビの適合場であるサクシヨンが0~2 kPa 発達する領域は、約48~49mの地点(2016年9月)から約56~62mと70~73mの2つの離れた地点(2016年10月)に沖側へ移動しており、2016年11月には約66~78mの地点に移動している。ヒメ

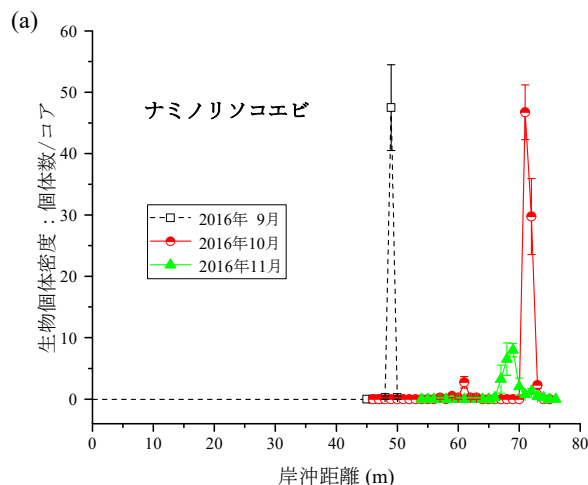


(a) 高波イベントに伴う砂浜の地形変化

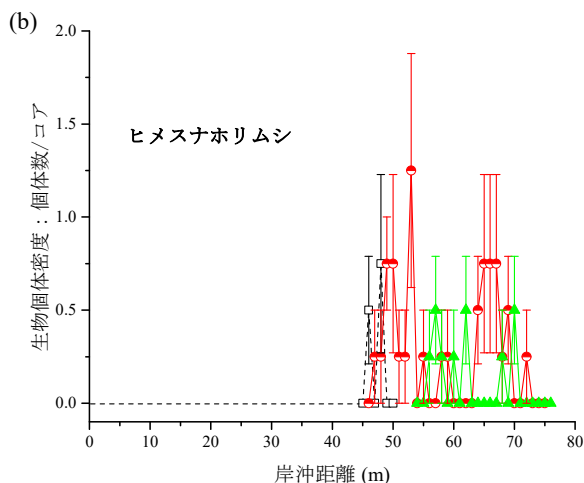


(b) 砂浜地形変化前後のサクシヨンの岸沖分布

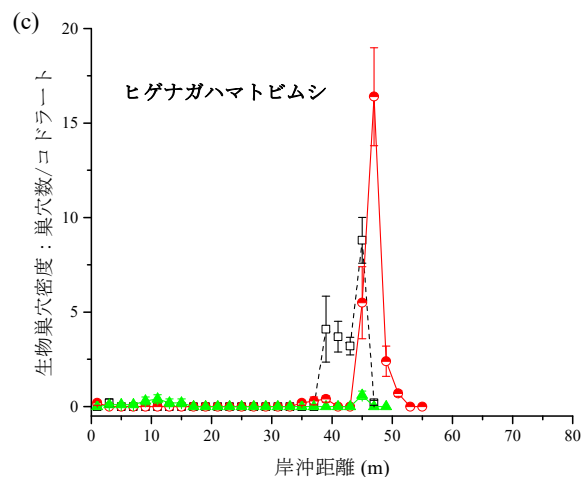
図-4.5 五ヶ浜海浜における高波イベントに伴う砂浜地形とサクシヨンの岸沖分布変化



(a) ナミノリソコエビ



(b) ヒメスナホリムシ



(c) ヒゲナガハマトビムシ

図-4.6 五ヶ浜海浜における砂浜地形変化前後の3種の小型甲殻類の生物密度(平均値±SE)の岸沖分布

スナホリムシの適合場であるサクシオンが 0~5 kPa の領域は、約 44~49 m の地点 (2016 年 9 月) から約 46~73 m の地点 (2016 年 10 月) に沖側へ大きく拡大しており、2016 年 11 月には約 60~78 m の地点に移動し、2016 年 10 月に比べ縮まっている。そして、ヒゲナガハマトビムシの適合場であるサクシオンが 3~10 kPa の領域は、約 34~46 m の地点 (2016 年 9 月) から約 41~51 m の地点 (2016 年 10 月) に沖側へ移動しており、2016 年 11 月には約 28~63 m の地点に移動している。

このような地形の大変化に伴う 3 種の小型底生甲殻類の地盤環境適合場の移動もしくは拡大によって、当該生物の岸沖分布も同様に移動又は拡大している (図-4.6)。具体的には、ナミノリソコエビは、約 49 m の地点 (2016 年 9 月) から約 61 m と 71~73 m の 2 つの離れた地点 (2016 年 10 月) に沖側へ移動しており、2016 年 11 月には約 66~74 m の地点に移動している。ヒメスナホリムシは、約 46~48 m の地点 (2016 年 9 月) から約 47~72 m の地点 (2016 年 10 月) に沖側へ大きく拡大している。2016 年 11 月には約 56~68 m の地点に移動し、2016 年 10 月に比べ生息範囲が縮まっているが、当該生物の分布限界であるサクシオンが 5 kPa を超えた地点でも分布しており、当該生物の適合場に向かって沖側へ移動しているところだと考えられる。そして、ヒゲナガハマトビムシの巣穴は、約 38~46 m の地点 (2016 年 9 月) から約 45~51 m の地点 (2016 年 10 月) に沖側へ移動しているが、2016 年 11 月には当該生物の密度が顕著に減り、当該生物分布の移動は確認できなかった。

新潟県沿岸に位置する間瀬及び五ヶ浜海浜に生息する 3 種の小型底生甲殻類の生物密度とサクシオンの関係を図-4.7 に示す。高波イベントに伴う砂浜地形の大変化後の各種の生物生息域は、砂浜地形の変化前と同様に、上述の地盤環境適合場に該当する範囲によく収まっており、当該生物の地盤環境適合場の一般性についても確認することができる。

さらに、統計分析を通じて、高波イベントによる砂浜地形変化に伴う 3 種の小型底生甲殻類の岸沖分布変化に最も大きな影響を及ぼす因子は、サクシオンであることを明らかにした。具体的な統計分析結果は、次のとおりである。ナ

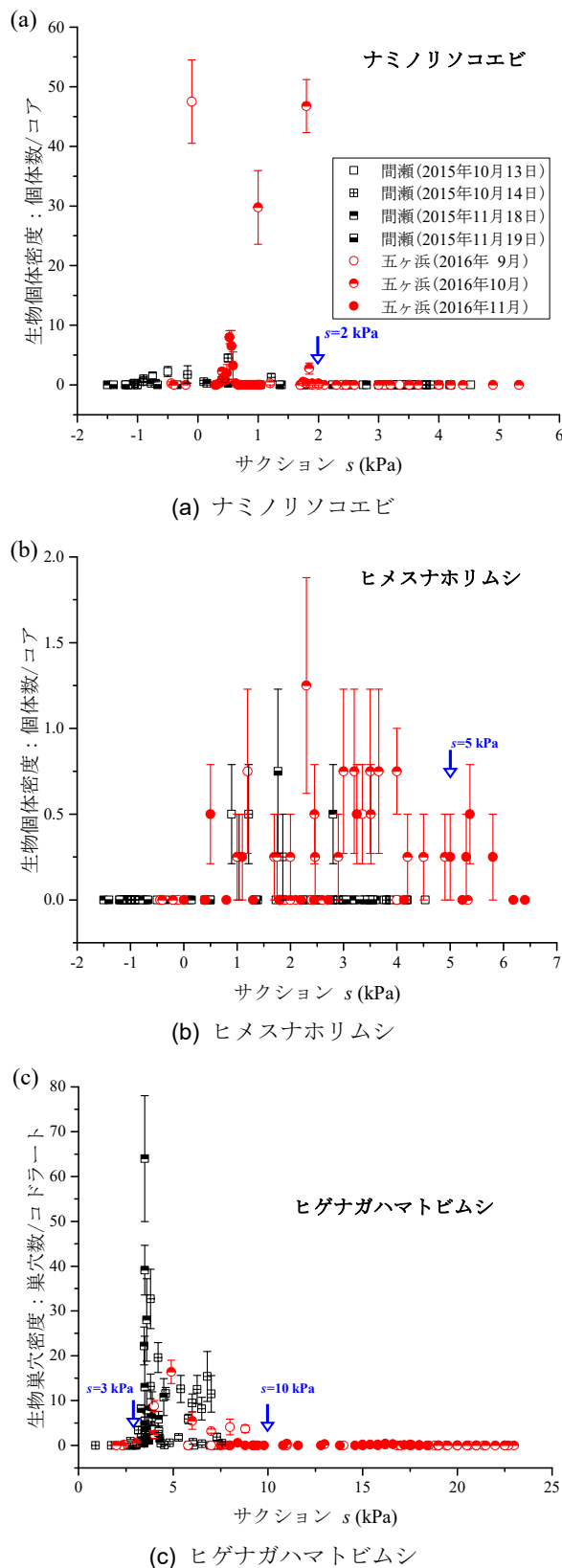


図-4.7 間瀬及び五ヶ浜海浜における砂浜地形変化前後の 3 種小型甲殻類の生物密度 (平均値 ± SE) とサクシオンの関係

ミノリソコエビとヒメスナホリムシの個体数、そして、ヒゲナガハマトビムシの巣穴に対する 37 個のモデル(帰無モデルを含む)の中で、サクシオン(Suction)を考慮したモデルが最小の AIC 値を示した(表-4.2, 付録 A)。この際、最も低い AIC 値は、当該変数が最も高い予測能力を有することを示している。

ナミノリソコエビの場合、一般的に、すべてのモデルが帰無モデルより低い AIC 値を示したが、サクシオン(Suction)を考慮したモデルが他のどのモデルより低い AIC 値を示した。サクシオン(Suction)を考慮したモデルの中では、ハードルモデル(Hurdle model)が通常の GLM より低い AIC 値を示した。最小の AIC 値を示したモデルは、1 段階目(Binomial)のステップでサクシオン(Suction)と日付(Date), 2 段階目(Count)のステップで現地調査地(Site)を考慮したハードル GLMM であった(表-4.2, 表-4.3)。ヒメスナホリムシの場合、一般的にハードルモデルは効果的ではなく、一部のハードルモデルは帰無モデルよりも高い AIC 値を示していた。最小の AIC 値を示したモデルは、サクシオン(Suction)を考慮した通常の GLM であった(表-4.2, 表-4.3)。ヒゲナガハマトビムシの巣穴の場合、一部のハードルモデルは帰無モデルに比べ効果的では無かったが、サクシオン(Suction)を考慮したモデルは、他のモデルよりも一貫

して低い AIC 値を示した。最小の AIC 値を示したモデルは、1 段階目のステップでサクシオン(Suction)と日付(Date), 2 段階目のステップで現地調査地(Site)とサクシオン(Suction)を考慮したハードル GLMM であった(表-4.2, 表-4.3)。

以上の統計分析結果は、砂浜の多様な底生生物分布を評価予測する上で、サクシオンが最も重要な地盤環境変数であることを実証している。

4.5 まとめ

本章では、沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、日本海沿岸の砂浜に生息する 3 種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシを対象とし、高波イベントに伴う砂浜地形の顕著な変化による生物生息分布の変化とその要因に対するメカニズムを地盤環境適合場の観点から明らかにすることを目的として、土砂物理環境と底生生物の一体調査及び統計分析を行った。その結果、砂浜地形変化による 3 種の小型底生甲殻類の岸沖分布変化とサクシオンを核とした地盤環境適合場の間には密接な関係があり、各底生生物の固有のサクシオン適合場に従って岸沖生物分布変化が発現していることを明らかにした。

表-4.2 ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシの巣穴に対する一般化線形モデル (GLM) と一般化線形混合モデル (GLMM) の Delta-AIC 値 (付録 A). 全体 37 個のモデルの中から最小の delta-AIC 値を示す五つのモデルと帰無モデルの結果を示している. 全 37 個のモデルに対する結果は付録 A に示す.

	Model	Predictor variables*		delta-AIC	Rank
		Ordinary models or count step for hurdle models	Binomial step for hurdle models		
ナミノリ ソコエビ	Hurdle GLMM	Site	Suction, Date	0	1
	Hurdle GLMM	Site, Date	Suction, Date	0.5	2
	Hurdle GLMM	Site, Suction	Suction, Date	3.5	3
	Hurdle GLMM	Site, Suction, Date	Suction, Date	3.9	4
	Hurdle GLM	Site	Suction	25.3	5
	Null			139.9	37
ヒメスナ ホリムシ	Ordinary GLM	Site, Suction		0	1
	Ordinary GLM	Site, Distance		11.9	2
	Ordinary GLM	Site, Slope		12.4	3
	Hurdle GLM	Site	Distance	14.3	4
	Hurdle GLMM	Site, Distance, Date	Distance, Date	15.9	5
	Null			42.1	33
ヒゲナガハマト ビムシの巣穴	Hurdle GLMM	Site, Suction	Suction, Date	0	1
	Hurdle GLMM	Site, Suction, Date	Suction, Date	0.3	2
	Hurdle GLMM	Site	Suction, Date	25.0	3
	Hurdle GLMM	Site, Date	Suction, Date	25.6	4
	Hurdle GLM	Site, Suction	Suction	52.7	5
	Null			655.2	37

*地盤環境変数 (岸沖距離, Distance; サクション, Suction; 地盤高, Height; 砂浜勾配, Slope) は, 1 次項と 2 次項の両方に含まれている. 日付 (Date) は確率変数として含まれている. 帰無 (Null) モデルには切片のみ含まれている.

表-4.3 コアサンプラーのナミノリソコエビとヒメスナホリムシの個体数, 及びコドラートのヒゲナガハマトビムシの巣穴数に対する最小の AIC 値を示すモデルのパラメーター値

	ナミノリソコエビ	ヒメスナホリムシ	ヒゲナガハマトビムシの巣穴
First (binomial) step			
fixed factors			
intercept	1.95***	-	-0.88
Suction	5.38***	-	2.97***
Suction^2	3.46***	-	4.10***
random factor			
Date (variance)	1.34	-	0.88
Second (count) step			
fixed factors			
intercept	-14.90	-1.33***	0.49
Site (Maze)	-2.88***	-1.67***	0.54***
Suction	-	0.95***	-3.72***
Suction^2	-	-0.66**	-2.63**
random factor			
Date (variance)	-	-	-
theta of negative binomial	6.73x10 ⁻⁹	-	0.95
residual df	453	456	901

** p < 0.01; *** p < 0.001

5. 台風イベントによる干潟地形変化に伴う底生生物の生息分布変化と地盤環境適合場の検証

5.1 はじめに

イベント過程を踏まえた沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、本章では、常時及び台風イベントによる干潟生物動態・分布を、地盤環境動態・適合場の観点から調査しその適用性を検証する。

5.2 台風イベントによる干潟の地形・粒度動態

本研究の調査対象干潟である那覇干潟(瀬長島地先)と名蔵アンパル干潟の場所を、両干潟直上又は近傍を通過した2015年5月の台風6号及び同年8月の台風15号の台風経路とともに図-5.1に示す。現地調査は、各台風が通過した5~7日後に、上述の砂質干潟の典型的な巣穴生物であるコメツキガニを対象として実施した。具体的には、上記両干潟における岸沖沿岸両方向の地盤高・地下水位・サクシジョンの変化と生物分布・密度に関する生物動態—地盤環境動態の平

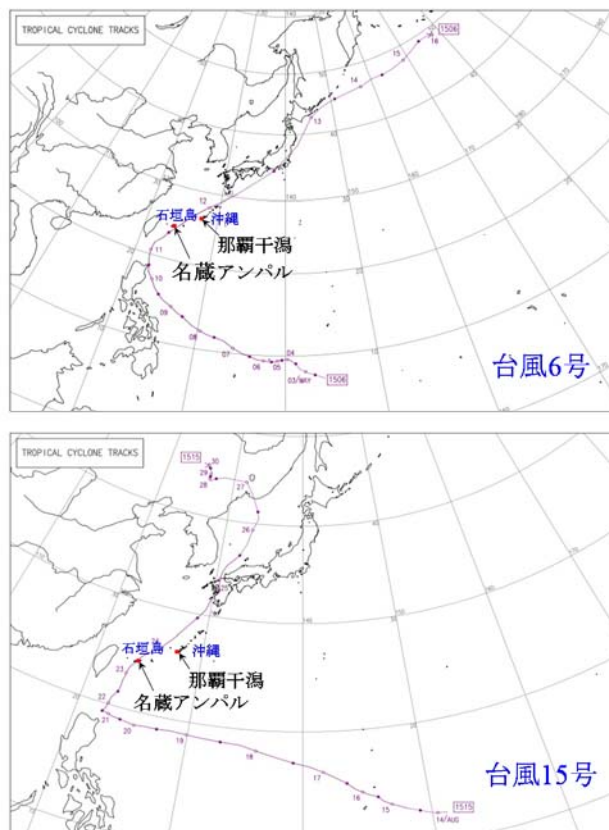


図-5.1 平成 27 年台風 6 号及び台風 15 号の台風経路

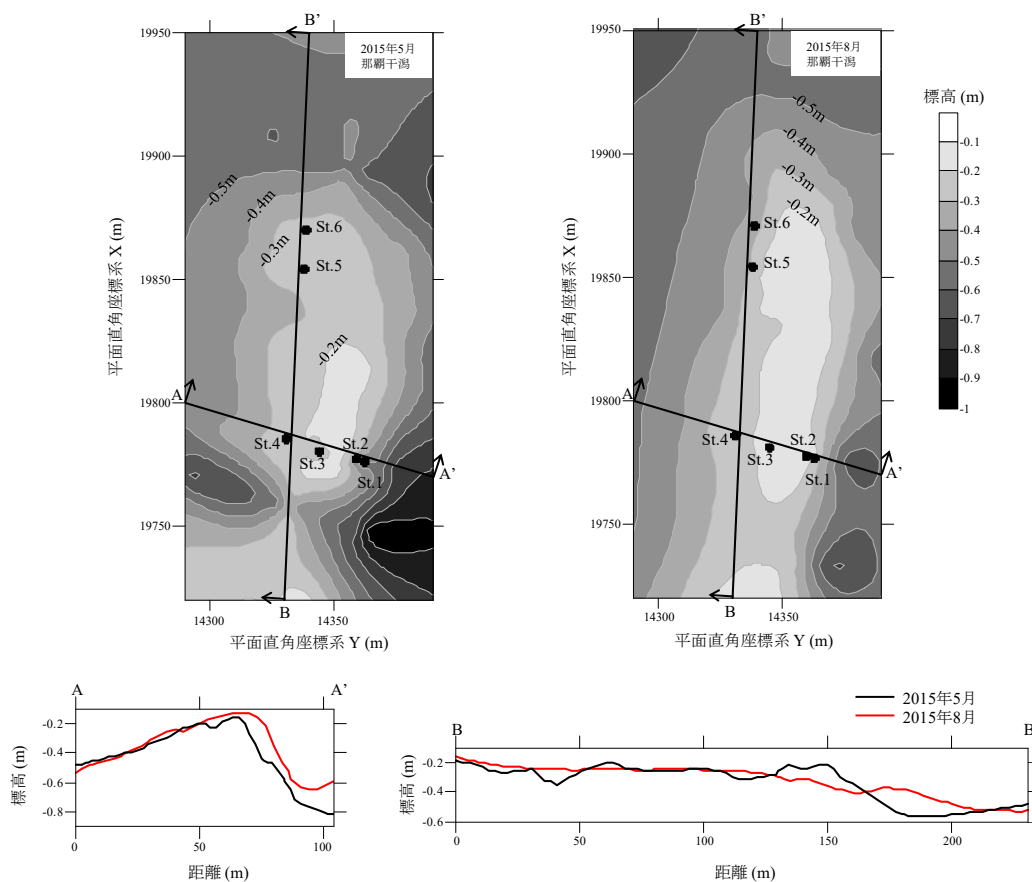


図-5.2 那覇干潟における台風イベントに伴う地形・地盤高コンター図と断面図

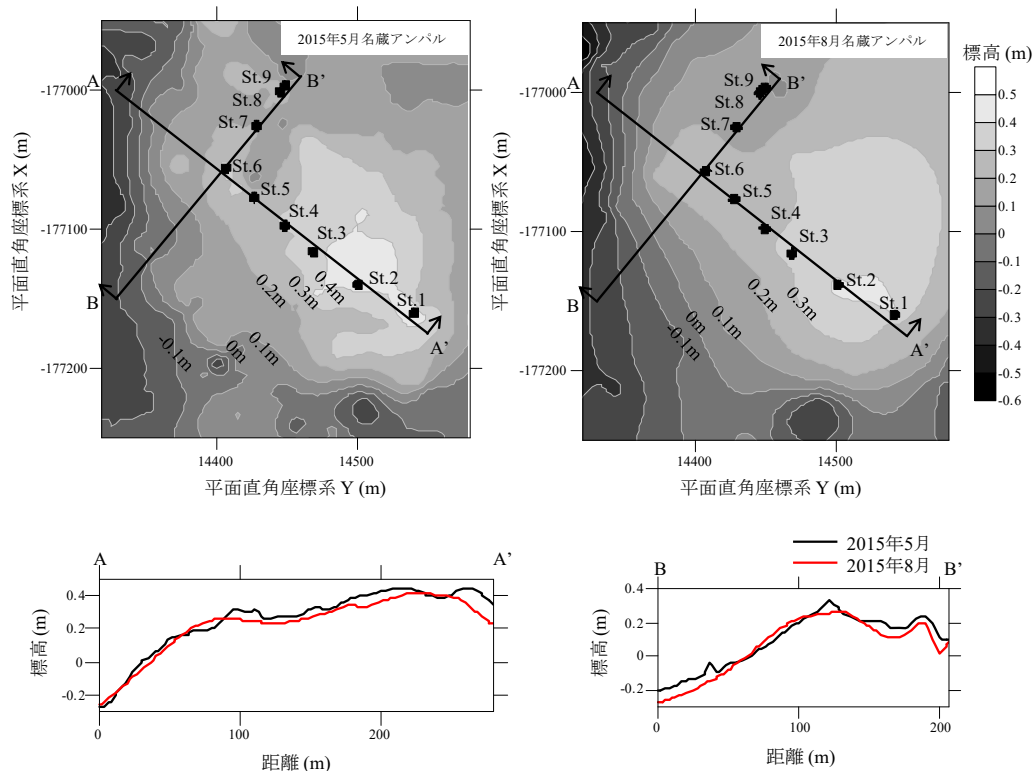


図-5.3 名蔵アンパル干潟における台風イベントに伴う地形・地盤高コンター図と断面図

面一体調査を実施し、同分析結果を2011年～2012年の両干潟で実施した常時(2,3月の晴天時)の結果と比較した。ここに、沖縄の2,3月は、台風シーズンから半年以上経った穏やかな天候が続く季節に対応している。この際、台風イベントに伴う地形・地盤高の変化を、ネットワーク型RTK方式(VRS)によるGNSS測量を通じて評価した。上記2つの台風イベントに伴う那覇干潟及び名蔵アンパル干潟での地形・

地盤高コンターを図-5.2と図-5.3に各々示す。同図には、各調査地点を含む岸沖沿岸両方向の測線(A-A', B-B')上の地形断面図も合わせて示している。

台風後、那覇干潟では、沖側で侵食、岸側で堆積し、名蔵アンパル干潟では、全体的に侵食の傾向となり、これに対応して、各干潟の粒度も変化した。同イベントに伴う両干潟の粒度分布を図-5.4に示す。那覇干潟では、沖側で侵食

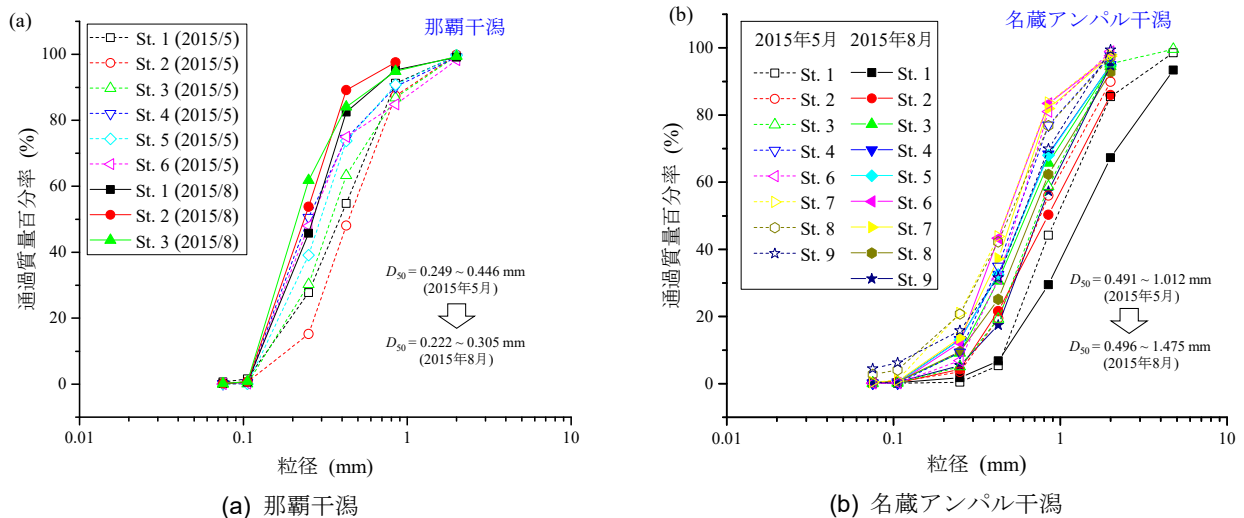


図-5.4 台風イベントに伴う両干潟の粒度分布

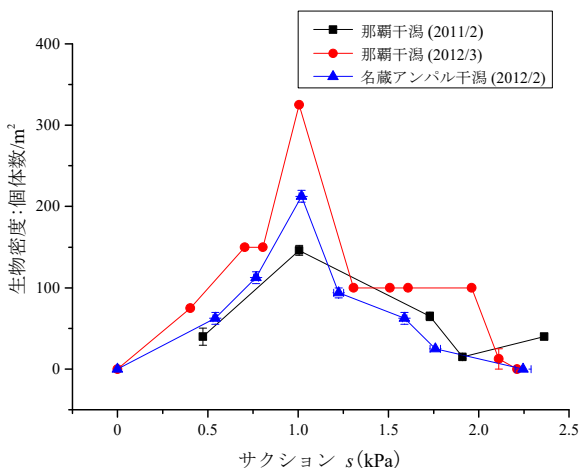


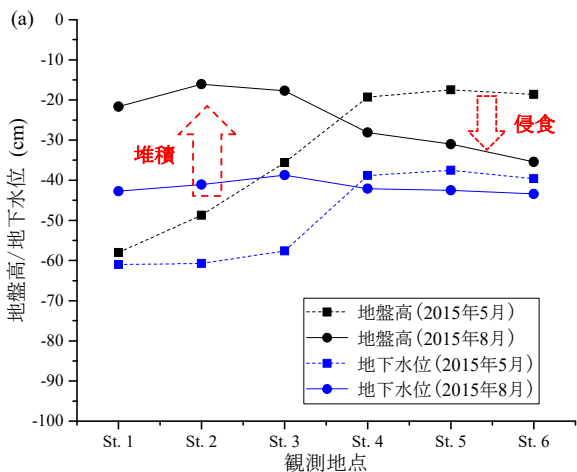
図-5.5 両干潟の生物密度(平均値 ±SE)とサクシジョンの関係：常時

された細砂が岸側に堆積した結果、岸側の粒度が細粒化していた。一方、名蔵アンバル干潟では、全体的に侵食された結果、粗粒化したことがみてとれる。

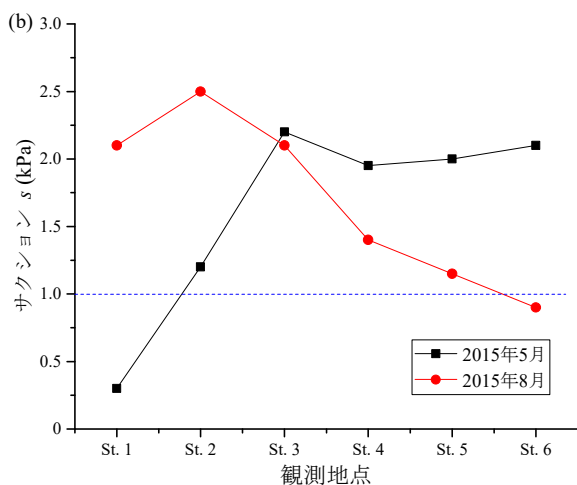
5.3 台風イベントによる干潟底生生物分布の変化と地盤環境適合場の検証

本節では、上述の那覇干潟(瀬長島地先)及び名蔵アンバル干潟において、砂質干潟の典型的な巣穴生物であるコマツギガニ(*Scopimera globosa*)を対象として実施した2015年5月の台風6号及び同年8月の台風15号に伴う生物動態の調査結果について考察する。

両干潟における常時のサクシジョンと生物個体密度の関係を図-5.5に示す。本結果から、同生物分布はサクシジョン1

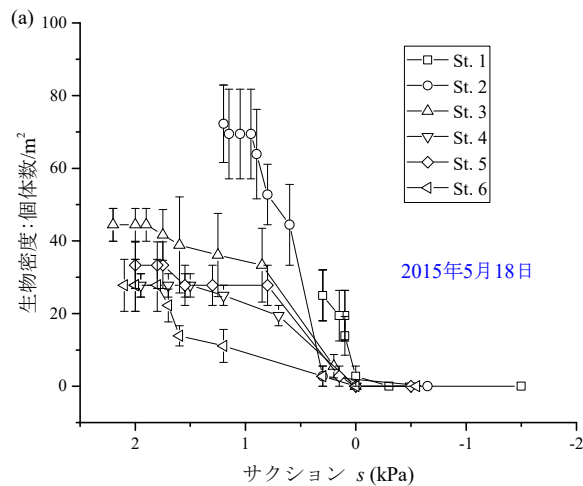


(a) 台風イベントに伴う地盤高・地下水位の変化

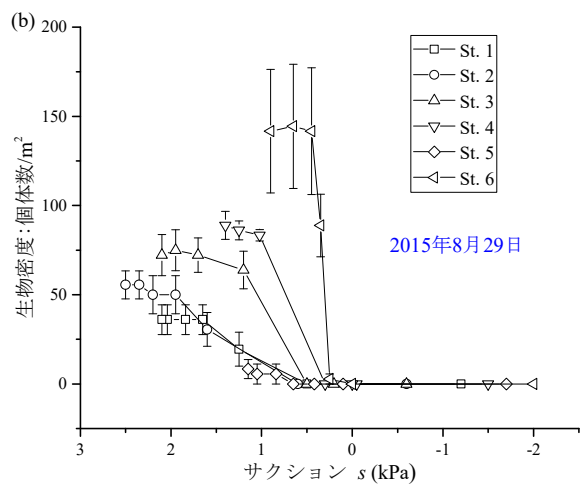


(b) 地形変化に伴うサクシジョンの変化

図-5.6 那覇干潟における台風イベントに伴う地盤高・地下水位・サクシジョンの変化



(a) 台風6号通過後



(b) 台風15号通過後

図-5.7 那覇干潟における台風イベントに伴う生物密度(平均値 ±SE)－サクシジョン動態の関係

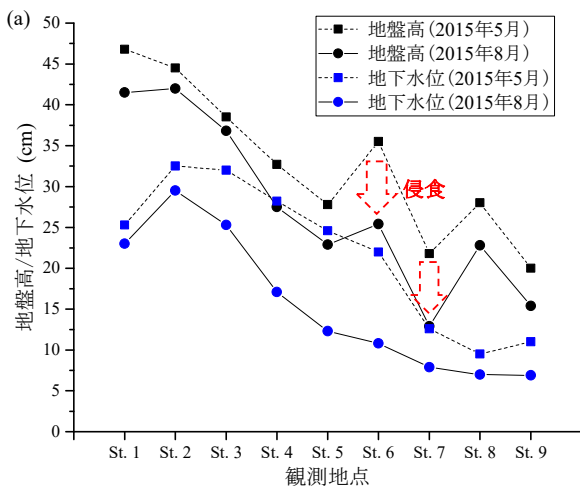
kPaで明瞭なピークを有していることが分かる。当該サクシジョン値は、同生物の巣穴住活動の最適場に対応しており、また、同生物が、サクシジョンの空間分布を探知・移動し生息分布を形成することを、地盤環境を制御した室内実験結果ならびに現地調査結果と生物動態—地盤環境動態のリンクモデルの連携により明らかにしている^{28),32)}。このような生態地盤学の知見を台風イベント下で詳しく検証した。

那覇干潟における台風6号及び15号後の地盤高・地下水位・サクシジョンの変化を図-5.6に示している。観測地点は6地点であり、図-5.6(a)の結果から、台風イベントに伴って、地盤高は大きく変動し、地点によって最大40 cm堆積、20 cm侵食したことがわかる。これに対応して、サクシジョン分布も大きく変化し(図-5.6(b))、上述の同生物の最適地盤環

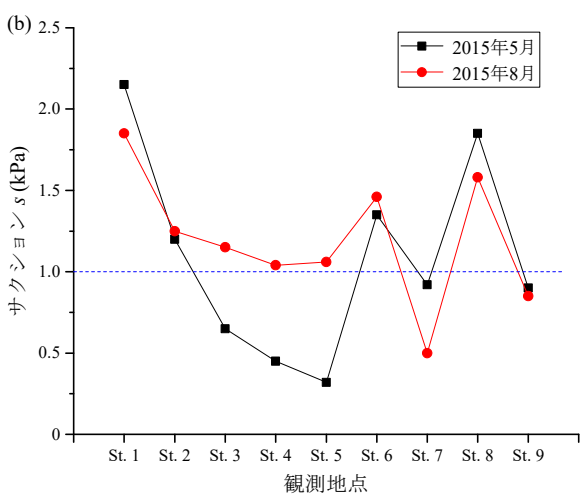
境場(サクシジョン 1 kPa)が、5月の地点2近傍から、8月には地点6近傍へと空間的に顕著にシフトしたことがわかる。この際、同等のサクシジョン場でも、地盤高は大きく異なっていることに注意する。

図-5.7は、対応する生物個体密度(平均値 ± SE)とサクシジョン動態の関係を示している。本結果から、上述の生態地盤学の知見と見事に整合するかたち、すなわち、台風6号直後の5月には、上記最適場に対応する地点2で、台風15号直後の8月には、当該イベント過程により新たに生じた上記最適場に対応する地点6で、顕著な個体群集のピークが得られていることが分かる。

これらの事実は、Sassa and Watabe (2008) と Sassa and Yang (2019b)の研究結果を踏まえると、当該干潟生物が、台風

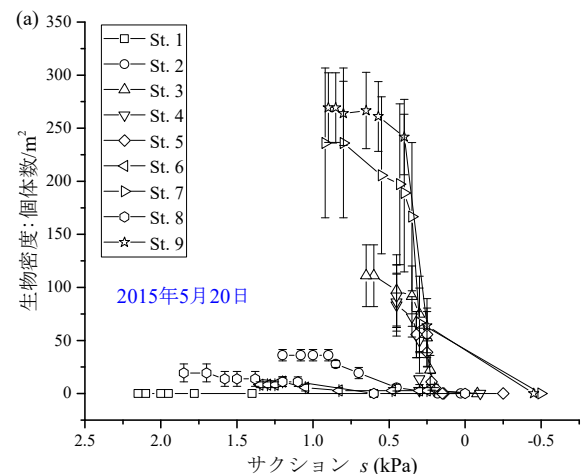


(a) 台風イベントに伴う地盤高・地下水位の変化

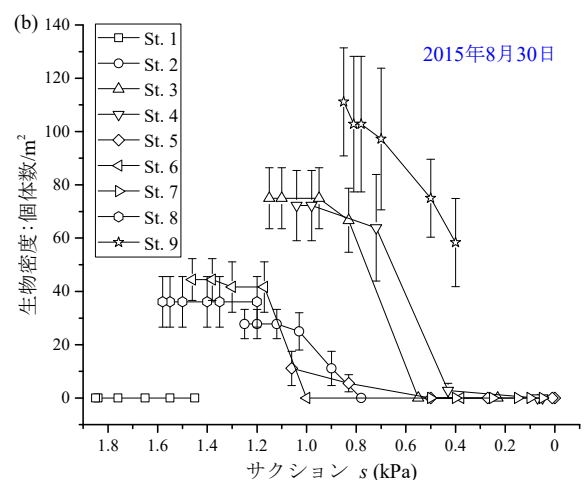


(b) 地形変化に伴うサクシジョンの変化

図-5.8 名蔵アンパル干潟における台風イベントに伴う地盤高・地下水位・サクシジョンの変化



(a) 台風6号通過後



(b) 台風15号通過後

図-5.9 名蔵アンパル干潟における台風イベントに伴う生物密度(平均値 ± SE) —サクシジョン動態の関係



図-5.10 名蔵アンパル干潟のエイの摂餌行動の痕跡

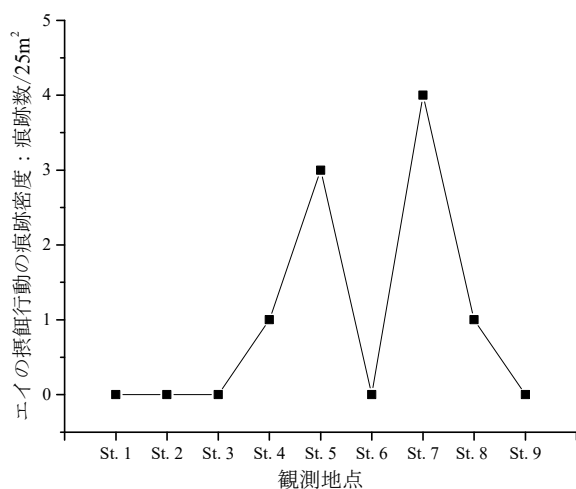


図-5.11 名蔵アンパル干潟のエイの密度分布

イベント後、数日スケール以内の短期間において地盤環境動態・変化を探知し、新たな生息分布を生物固有の適地盤環境場に形成することを如実に示している。

アンパル干潟における台風6号及び15号後の地盤高・地下水水位・サクシジョンの変化を図-5.8に示す。観測地点は9地点であり、図-5.8(a)より台風イベントに伴って同全域が侵食されたことがわかる。対応する生物個体密度(平均値±SE)とサクシジョン動態の関係を図-5.9に示す。本結果から、台風6号直後の5月には、上述の最適地盤環境場が得られる地点7及び9で顕著な個体群集のピークが現れていることがわかる(図-5.8(b), 図-5.9(a))。

一方、台風15号後の8月には、最適地盤環境に対応する地点9, 4, 5の内、地点5のみ低い生息密度であった(図-5.9(b))。当該地点は、同干潟の当年夏期のエイによる底生生物の摂餌(図-5.10)場所と一致していたことが、同干潟に

おけるエイの密度分布の調査結果(図-5.11)から判明しており、当該生物間相互作用の影響が明らかとなった。

5.4 まとめ

本章では、イベント過程を踏まえた沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、干潟生物動態・分布におけるサクシジョンを核とした地盤環境適合場の役割に関する既往の知見に照らして、常時及び台風イベントに伴う干潟生物動態と地盤環境動態の一体調査および分析を行った。その結果、大きな地盤環境変化に伴う生物動態と分布変化が、生態地盤学の知見・予測と見事に整合するかたちで定量的に発現することをはじめて明らかにした。また、生物間相互作用の影響を合せて示した。

6. 沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測プラットフォームの開発と適用

6.1 はじめに

本章では、沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全に活用しうる基盤として、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態の統合評価予測を実現しうる沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築する。又、当該統合評価予測プラットフォームの現地への適用を行い、台風・高波イベントによる干潟及び砂浜の地形変化に伴う底生生物の生息分布変化を評価・予測し、当該プラットフォームの有効性を検証する。

6.2 沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームの構築

(1) 開発したプラットフォームの構成と統合評価予測フローチャート

沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームは、2章で記した拡充・発展した生物住環境診断チャート(図-2.4)と飽和・不飽和浸透流解析手法の組み合わせで構成されており(図-6.1)、統合評価予測フローは図-6.1のとおりである。具体的には、統合評価予測の第1ステップで

は、当該プラットフォームの解析モデルである有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析から地盤表層の間隙水圧分布を算出し、式(1)に示したサクシオンと間隙水圧の関係から地盤表層のサクシオン分布を求める。第2ステップでは、第1ステップで得られた地盤表層のサクシオン分布と拡充・発展した生物住環境診断チャート(図-2.4)に基づいて、各種底生生物の生息可能な領域を評価・予測する。

(2) 飽和・不飽和浸透流解析モデル

統合評価予測プラットフォームの解析モデルで用いた関係式⁹³⁾⁻⁹⁵⁾を、式(5)、式(6)及び式(7)に各々示す。

支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_r \left(k_{s(ij)} \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + k_{s(i3)} \right) \right) = (\beta S_s + C) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (5)$$

$$\beta = \begin{cases} 0 : \text{不飽和領域} \\ 1 : \text{飽和領域} \end{cases}$$

水分特性曲線モデル

$$S_e = \left(\frac{1}{1 + |\alpha \psi|^n} \right)^m, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$

不飽和透水係数モデル

$$k_r = \frac{k}{k_s} = \sqrt{S_e} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (7)$$

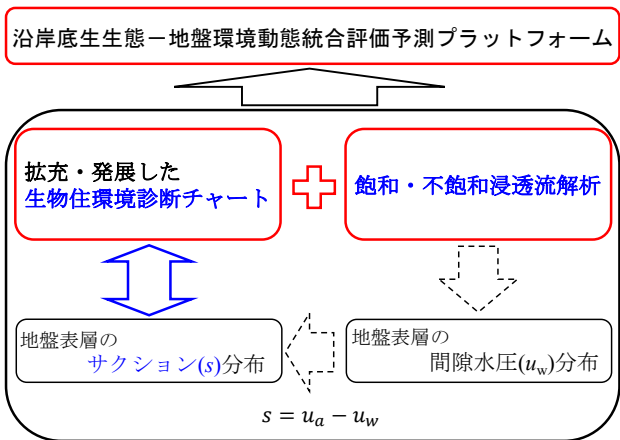


図-6.1 沿岸底生生態-地盤環境動態統合評価予測プラットフォームの構成とフローチャート

$$k_s(m/s) = 0.024622[D_{10}^2 e^3 / (1 + e)]^{0.7825} \quad (8)$$

ここに、 ψ は圧力水頭、 k_r は比透水係数、 k_s は飽和透水係数、 S_s は比貯留係数(=0.0001 m⁻¹)、 C は比水分容量、 S_e は有効飽和度(= $(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$)、 θ : 体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率)、 D_{10} は土砂の有効径である。飽和透水係数 k_s は、Chapuis(2004)が提案した式(8)を用い、比水分容量 C は、式(6)の水分特性曲線モデルから得ている。

6.3 干潟・砂浜地形変化に伴う地盤環境動態・底生生物分布変化の予測と検証

(1) 那覇干潟への適用

本節では、新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートと飽和・不飽和浸透流解析手法を組み合わせた沿岸底生生態-地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを、本報告の5章で述べた沖縄県那覇干潟(表層土砂の有効径 $D_{10} = 0.127 - 0.145$ mm, 体積含水率 $\theta = 0.145 - 0.5$, 間隙比 $e = 0.972 - 1.557$)における台風イベントによる干潟地形変化に伴う底生生物(コメツキガニ)分布変化予測に適用し、実測結果^{32), 41)}との比較・分析を行った。

本節で干潟地形変化に伴う生物生息分布変化の予測に適用するコメツキガニ(*S. globosa*)は、砂質干潟の典型的な底生生物であり、当該生物の巣穴住活動の最適場は、本報告の5章で述べたように、常時及び台風イベント後を通じてサクシオンが1 kPaの場となっている^{28), 32), 41)}。

図-5.2 に示した那覇干潟における台風イベントによる地形変化前後のコンター図に基づいて作成した本解析の3次元メッシュの立体図を図-6.2 に示す。そして、同図には現地調査を行った6つの観測地点も合わせて示している。台風イベント後、沖側では侵食、岸側では堆積が生じ、台風イベント前の二つの島のような地形は、台風イベント後には一つの島になっており、地形が大きく変わっていることが立体的に分かる。

那覇干潟における現地調査による実測値及び表層土砂の不攪乱サンプルに対する室内試験から得られた土砂の物性値(D_{10} , θ , e , S_r)に基づく解析条件を表-6.1 に示す。

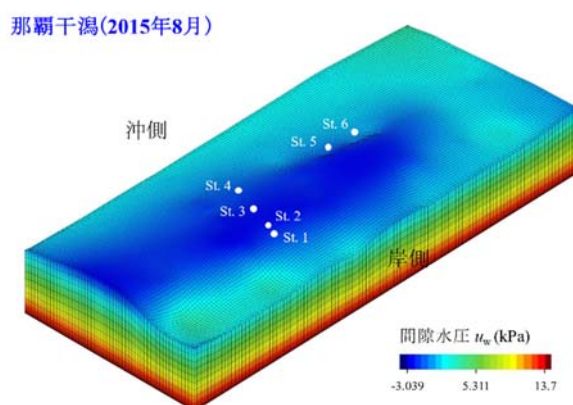
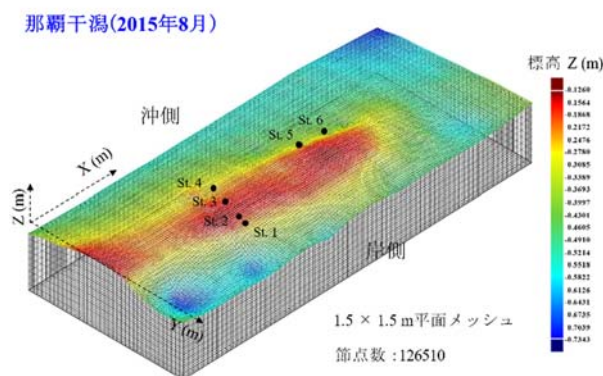
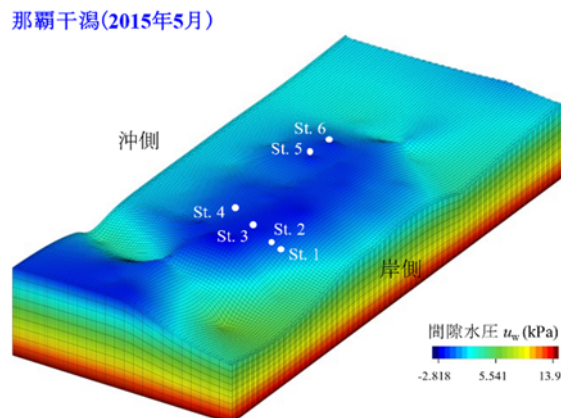
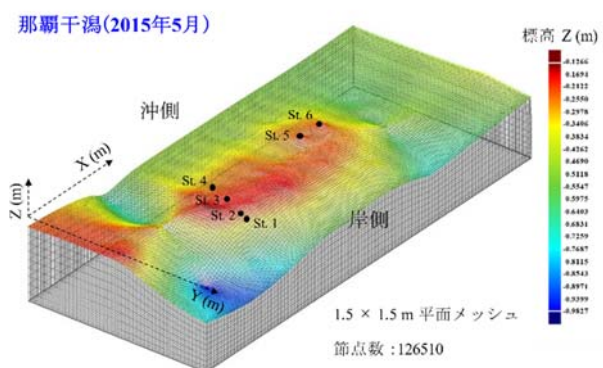


図-6.2 那覇干潟の地形変化前後における統合評価予測プラットフォームの解析モデルの3次元メッシュ

図-6.3 統合評価予測プラットフォームから得られた那覇干潟の地形変化前後における間隙水圧の3次元分布

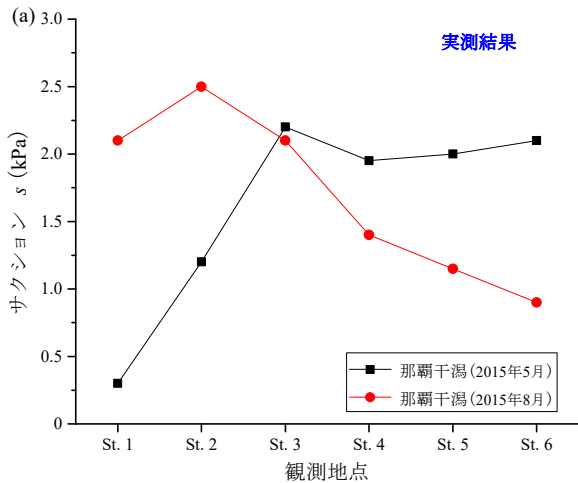
統合評価予測の第1ステップとして、当該プラットフォームの解析モデルである有限要素法による飽和・不飽和浸透流の定常解析から得られた那覇干潟の台風イベントによる地形変化前後の間隙水圧 ($u_w = \gamma_w \psi$, γ_w : 海水の単位体積重量) の3次元分布を図-6.3に示す。第2のステップとして、図-6.3の解析結果に基づいて、式(1)に示すサクシオンと間隙水圧の関係から得られた6つの観測地点における表層土砂のサクシオン分布を図-6.4に示す。図-6.4によると、

表-6.1 那覇干潟における統合評価予測プラットフォームの解析条件

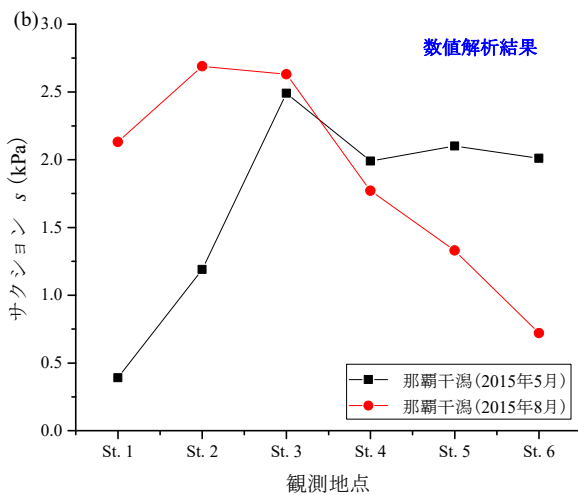
透水係数 k_s (m/s)	残留体積 含水率 θ_r	飽和体積 含水率 θ_s	水分特性曲線パラメータ		境界条件(全水頭)	
			α	n	岸側	沖側
1.2×10^{-3}	0.145	0.5	3.86	5.908	2015年5月	
					-0.41 m	-0.41 m
					2015年8月	
					-0.43 m	-0.43 m

数値解析結果は台風イベントによる地形変化に伴うサクシオン実測値の変化をよく捉えていることが分かる。又、コメツキガニの最適場 (1 kPa) が2015年5月の観測地点 St. 2 から2015年8月には観測地点 St. 6 に変化していることを精度よく再現している。6つの観測地点における実測結果と数値解析結果の関係は、2015年5月は 9.23 ± 11.06 (平均 \pm SD), 2015年8月には 16.06 ± 9.93 (平均 \pm SD) であり、20%の範囲内で収まっている。実際、那覇干潟は多様な生物活動によって微地形が発達しており、現地調査の際、約5m間隔で計測した平面測量結果に基づいて作成した3次元メッシュを用いた解析結果にも拘わらず、観測地点ごとのサクシオン値を精度よく予測しているといえる。

さらに、図-6.3の解析結果に基づく、式(1)に示すサクシオンと間隙水圧の関係から得られた表層土砂のサクシオン



(a) 実測結果



(b) 統合評価予測プラットフォームから得られた結果

図-6.4 台風イベントによる那覇干潟の地形変化前後における観測地点ごとのサクシオン変化

平面分布と新たな生物住環境診断チャート(図-2.4)に基づいて予測された当該生物の最適場であるサクシオン 1 kPa の領域を図-6.5 に示す. 当該生物の最適場(1 kPa)の領域は, 2015 年 5 月から 2015 年 8 月にかけて全体的に岸側へ移動していることが分かる. 具体的には, 2015 年 5 月の現地調査の時点で当該生物の最適場であった St. 2 は, 2015 年 8 月には台風イベントによる岸側の堆積によって限界場となり消失し, 当該生物の最適場は更に岸側へ移動していると予測される. 一方, 2015 年 8 月の当該生物の最適場である St. 6 は, 台風イベントによる沖側の侵食によって新たに形成された最適場であることが図-6.2 と図-6.5 の比較から分かる.

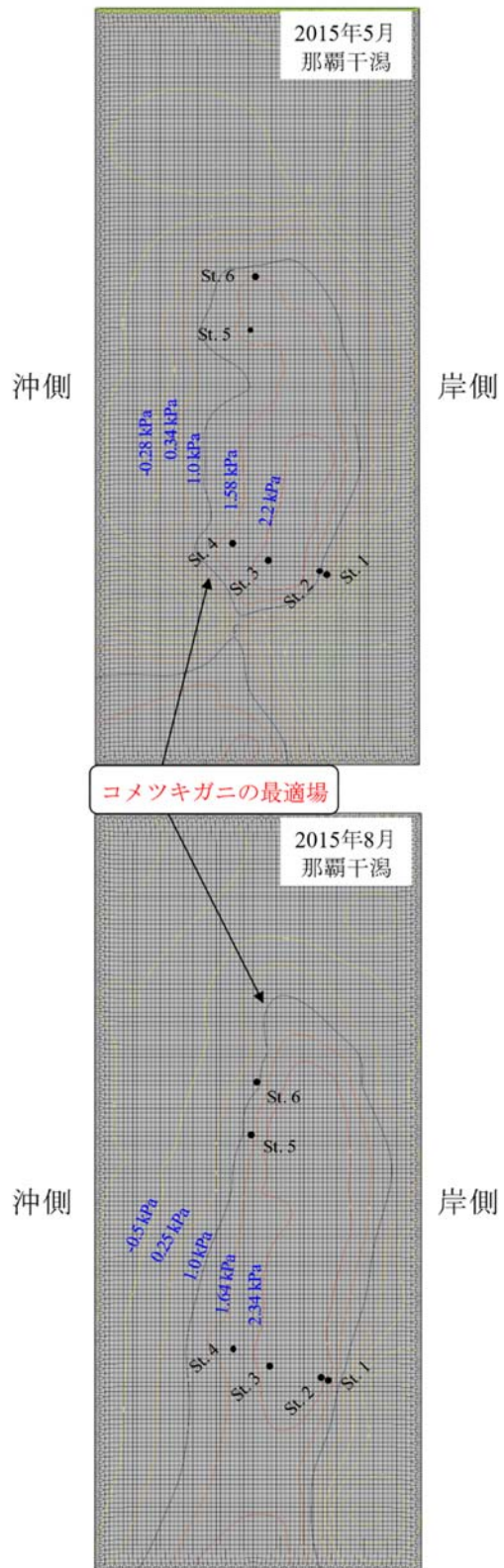
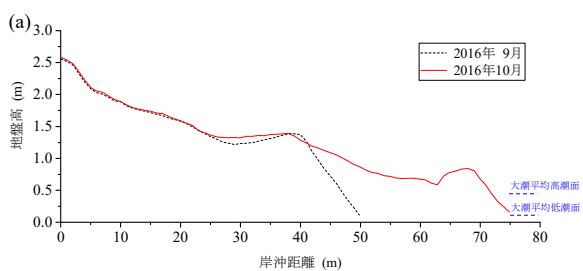


図-6.5 統合評価予測プラットフォームから得られた那覇干潟の地形変化前後における表層土砂のサクシオン平面分布とコメツキガニ最適場の変化

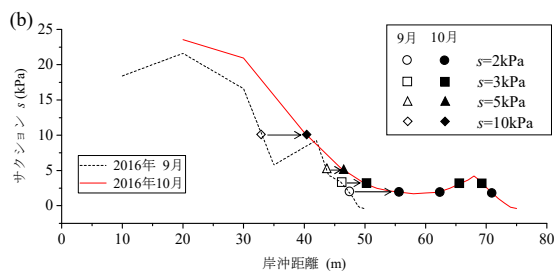
(2) 五ヶ浜海浜への適用

本節では、上述の拡充・発展した生物住環境診断チャートと飽和・不飽和浸透流解析手法を組み合わせた沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを、新潟県沿岸に位置する五ヶ浜海浜(表層土砂の有効径 $D_{10} = 0.116 - 0.142 \text{ mm}$, 体積含水率 $\theta = 0.036 - 0.422$, 間隙比 $e = 0.746 - 0.991$)における高波イベント前後の砂浜地形の大変化に伴う3種の小型底生生物分布変化予測に適用し、実測結果(42), 43)との比較・分析を行った。

一方、本節で生物生息分布変化の予測に適用する3種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシは、日本海沿岸に位置する砂浜の潮間帯及び潮上帯に生息する典型的な底生生物であり、3種の当該生物のサクシオンによる異なる3つの分布制御機構は、3章で述べたように、室内実験による検証を通じて明らかになっている(31)。即ち、ナミノリソコエビの分布限界であるサクシオン 2 kPa では、サクシオン動態による繰返し弾塑性収縮とそれに伴う土砂の高密度化並びに強度増加によって、潜砂が不可となる。ヒメスナホリムシは、サクシオンがある一定値(5 kPa)を超えると、水の吸引が阻害され呼吸不能となり死亡する。ヒゲナガハマトビムシの沖側

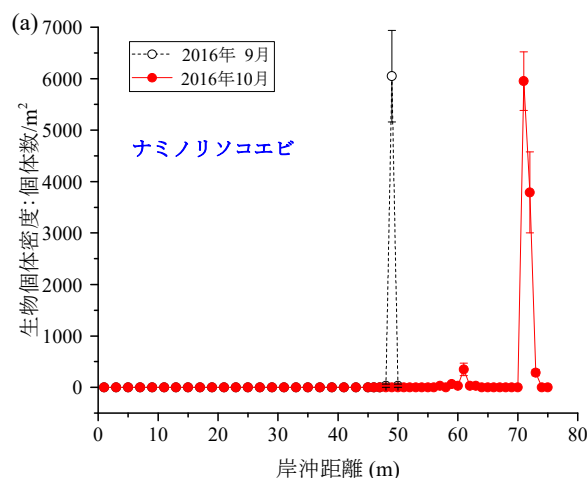


(a) 高波イベントに伴う砂浜地形の岸沖変化

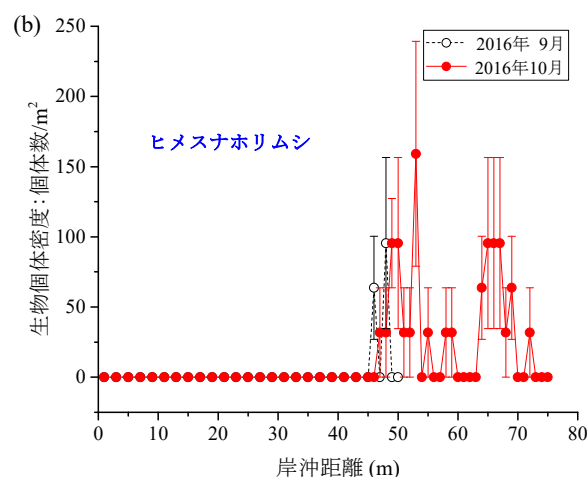


(b) 砂浜地形変化前後のサクシオンの岸沖分布

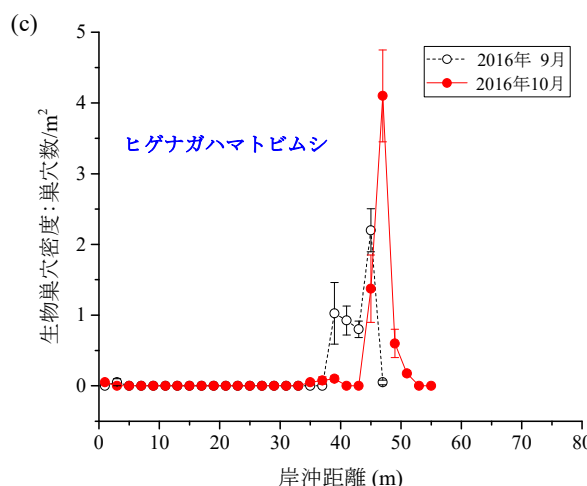
図-6.6 五ヶ浜海浜における高波イベントに伴う砂浜地形とサクシオンの変化



(a) ナミノリソコエビ



(b) ヒメスナホリムシ



(c) ヒゲナガハマトビムシ

図-6.7 五ヶ浜海浜における砂浜地形変化前後の3種の小型甲殻類の生物密度(平均値 ± SE)の岸沖分布

の分布限界であるサクシオン 3 kPa では、ナミノリソコエビと同様のメカニズムで潜砂不可となる。ヒゲナガハマトビムシの岸側の分布限界であるサクシオン 10 kPa では、サクシオンが過大になることによって、土粒子に水が吸着し土砂の実効粘着力が消失するため、巣穴を形成することが出来なくなる。

五ヶ浜海浜における高波イベントによる砂浜地形の岸沖変化とそれに伴うサクシオンの岸沖分布変化を示した図-4.5から2016年11月の実測結果を除いた結果を図-6.6、地形変化に伴う上述の3種の小型底生生物の岸沖分布変化を示した図-4.6から2016年11月の実測結果を除いた結果を図-6.7に示す。砂浜地形変化後(2016年10月)の地形は砂浜地形の変化前(2016年9月)に比べ、前浜部の沖側に大きく堆積が生じ、砂浜の岸沖距離が沖側に25m程大きく拡大している(図-6.6(a))。又、前浜部地形の顕著な変化に伴って表層土砂のサクシオンの岸沖分布も全体的に沖側に移動している(図-6.6(b))。このような地形の大変化による上述の各生物の固有のサクシオン適合場の変化に伴って、当該生物の岸沖生息分布は大きく変化している(図-6.7)。具体的には、ナミノリソコエビは約48~49mの地点から約56~62mと70~73mの2つの離れた地点に、ヒメスナホリムシは約44~49mの地点から約46~73mの地点に、そして、ヒゲナガハマトビムシは約34~46mの地点から約41~51mの地点にそれぞれ沖側に移動もしくは拡大したことが分かる。そして、当該生物の密度とサクシオンの関係については、上述の新たな住環境診断チャート(図-2.4)に示す当該生物の地盤環境適合場の範囲によく収まっていることは、本報告の4章で確認されている。

五ヶ浜海浜における現地調査による実測値及び表層土砂の不攪乱サンプルに対する室内試験から得られた土砂の物性値(D_{10} , θ , e , S_r)に基づく解析条件を表-6.2に示す。

統合評価予測の第1ステップとして、当該プラットフォームの解析モデルである有限要素法による飽和・不飽和浸透流の定常解析から得られた五ヶ浜海浜の地形の大変化前後の間隙水圧の岸沖分布を図-6.8に示す。第2のステップとして、図-6.8の解析結果に基づいて、式(1)に示すサクシオンと間隙水圧の関係から得られた表層土砂のサクシオン岸沖分布と新たな生物住環境診断チャート(図-2.4)に基づいて

予測された上述の3種の小型底生甲殻類の生息可能領域を図-6.9に各々示す。砂浜地形の大変化前後において、予測された砂浜潮間帯のサクシオンの岸沖分布及び各底生生物の生息可能領域は、現地のサクシオンの岸沖分布(図-6.6(b))及び当該底生生物の岸沖分布(図-6.7)を精度よく再現していることが分かる。しかしながら、予測された砂浜潮上帯のサクシオンの分布と岸側のヒゲナガハマトビムシの生息可能限界については、現地結果(図-6.6(b), 図-6.7(c))を反映していないことが分かる。その理由として、低飽和領域で

表-6.2 五ヶ浜海浜における統合評価予測プラットフォームの解析条件

透水係数 k_s (m/s)	残留体積 含水率 θ_r	飽和体積 含水率 θ_s	水分特性曲線パラメータ		境界条件(全水頭)	
			α	n	岸側	沖側
3.6×10^{-4}	0.036	0.422	3.35	4.837	1.1m	0.2m

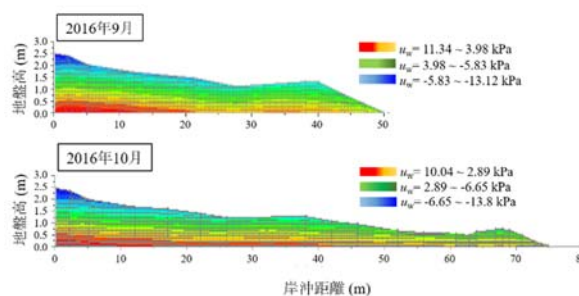


図-6.8 統合評価予測プラットフォームから得られた五ヶ浜海浜の砂浜地形の大変化前後における間隙水圧の岸沖分布

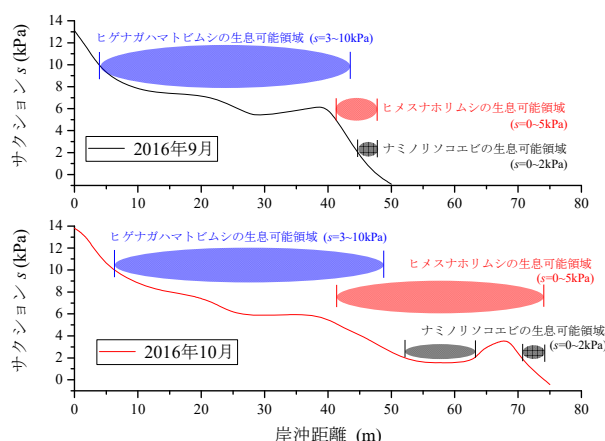


図-6.9 統合評価予測プラットフォームによる砂浜地形の大変化に伴う表層土砂のサクシオン並びに3種の小型底生甲殻類の岸沖分布変化

ある砂浜潮上帯での蒸発散の影響が考慮されていないことがあげられ、今後の課題として考えられる。

6.4 まとめ

本章では、沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全に活用しうる基盤として、沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築し、現地への適用を行った。その結果、当該プラットフォームは、台風・高波イベントによる干潟及び砂浜の地形変化に伴う各種底生生物分布域の移動・拡大を統合的に予測・再現しており、その有効性を実証した。

7. 結論

筆者らは、序論で記したように新たな学際領域である生態地盤学の展開によって、干潟・砂浜の多種多様な底生生態と地盤環境動態の関わりを世界に先駆けて明らかにし、複数の干潟・浅場造成事業でその有効性を実証してきている。

本報告では、上述のこれまでの知見に基づいて、沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全に活用しうる基盤として、沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームの構築及び現地への適用を行い、当該プラットフォームの有効性を検証した。以下では、各章で得られた主な知見とその有効性についてまとめる。

2章では、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態の統合評価予測を実現しうる沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測技術の柱の一つとして、生物住環境診断チャートを新たに拡張した。拡充・発展した生物住環境診断チャートに基づくサクシオンを核とした地盤環境動態と生物種の多様性の間の密接な関係は、造成干潟における現地調査結果とよく整合することを明らかにした。

3章では、日本と韓国に位置し潮差が大きく異なる砂浜の潮間帯に生息するナミノリソコエビと遺伝子構造が近い近縁種を含む4種の小型底生端脚類及び小型底生等脚類であるヒメスナホリムシの生物分布とサクシオンの関係にお

いて、砂浜と潮差の違い及び潮位の変動に関わらず、共通的な地盤環境適合場が存在することを明らかにした。更に、新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートの当該底生生物に対する地盤環境適合場とよく対応していることを実証した。当該端脚類・等脚類は世界各地で広く見られることから、これらの知見は世界中の砂浜の水産資源の保全に有効に活用されることが期待できる。

4章と5章では、沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、高波・台風イベントによる砂浜及び干潟生物動態・分布を、地盤環境動態・適合場の観点から調査及びその適用性の検証を行った。

4章では、日本海沿岸の砂浜の潮間帯及び潮上帯に生息する典型的な底生生物である3種の小型底生甲殻類、即ち、ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシの生息分布は、高波イベントによる砂浜地形変化に伴って砂浜の岸沖方向に変化し、当該岸沖分布変化はサクシオンを核とした地盤環境適合場と密接な関係があり、各底生生物の固有のサクシオン適合場に従って岸沖生物分布変化が発現していることを明らかにした。本知見は、砂浜の水産資源等の保全・管理及び生物動態を評価予測しうる基盤として有効に活用することが期待できる。

5章では、砂質干潟の典型的な底生生物であるコマツキガニにおいて、台風イベントによる干潟の大きな地盤環境改変に伴う当該生物動態と分布変化は、当該生物の動態・分布におけるサクシオンを核とした地盤環境適合場の役割に関する知見・予測と見事に整合するかたちで定量的に発現することを明らかにした。

6章では、2章で新たに拡充・発展した生物住環境診断チャートと飽和・不飽和浸透流解析手法を組み合わせた沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームを構築し、現地への適用を行った。当該統合評価予測プラットフォームは、台風・高波イベントによる干潟及び砂浜の地形変化に伴う各種底生生物の分布域の移動・拡大を統合的に予測・再現しており、その有効性を実証した。当該プラットフォームは、干潟・砂浜を含む沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全・回復に有効に活用することが期待できる。

本研究では、多種多様な沿岸底生生態と地盤環境動態の統合評価予測を実現しうる沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測プラットフォームを構築した。そして、生物種多様性—サクシオンを核とした地盤環境動態のリンク並びに潮位及び地形変化に伴う多様な底生生物生態に果たす地盤環境動態の役割の一般性について、地盤環境動態・適合場の観点から国内外の現地調査及び分析を通じて明らかにした。さらに、構築した沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームは、台風や高波イベントによる地形変化に伴う各種底生生物分布域の変化を統合的に予測再現するなど、その有効性を包括的に実証した。本研究で開発した当該プラットフォームは、干潟・砂浜を含む沿岸環境の整備、維持管理及び沿岸生態系の保全・回復に有効に活用されると共に、今後、全世界の各地に深刻な影響を与えている地球規模の気候変動に伴う沿岸地盤環境変化及びそれに伴う沿岸生態系変化を定量的に評価・予測しうる基盤として有効に活用することが期待できる。

(2020年11月2日受付)

謝辞

本研究は、JSPS科学研究費補助金基盤研究(A)「沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発(課題番号:JP15H02265)」の助成を受けたものである。新潟県沿岸の海浜、北海道の斜里海浜及び韓国の海浜における現地調査は、国立研究開発法人水産研究・教育機構日本海区水産研究所の高田宜武主幹研究員と連携して実施したものである。又、韓国の海浜に対する現地調査は、韓国仁荷大学のHONG Jae-Sang 教授、韓国沿岸環境生態研究所のKIM Sungtae 研究員、LEE Chae-Lin 研究員の協力を得て実施した。そして、本研究の全般で行われた干潟及び砂浜における地形測量では、元動土質研究グループ研究員の渡辺啓太氏(現国土交通省北陸地方整備局敦賀港湾事務所)、元動土質研究グループ研究員の後藤翔矢氏(現国土交通省北陸地方整備局敦賀港湾事務所)の協力を得た。ここに記して、関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

1) 環境省: 海洋生物多様性保全戦略, <http://www.env.go.jp/nature/biodic/kaiyo-hozen/>.

- 2) 国土交通省港湾局: 海の自然再生ハンドブック, 第2巻, 干潟編, 138p., 2003.
- 3) 新保裕美, 田中昌宏, 池谷毅, 越川義功: アサリを対象とした生物生息地適性評価モデル, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1111-1115, 2000.
- 4) 村上和男, 田中章, 久喜伸晃, 林永悟, 明瀬一行, 宮本由朗, 市村康: HIS モデルの構築と干潟の生物生息環境評価, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 1146-1150, 2005.
- 5) 蔣勤, 福濱方哉, 加藤史訓: 砂浜海岸生態系の環境影響評価に関する基本的な検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1111-1115, 2006.
- 6) Ellis, J., Ysebaert, T., Hume, T., Norkko, A., Bult, T., Herman, P., Thrush, S. and Oldman, J.: Predicting macrofaunal species distributions in estuarine gradients using logistic regression and classification systems, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 316, pp. 69-93, 2006.
- 7) 熊田貴之, 宇多高明, 芹沢真澄: チョウセンハマグリ の生息分布の予測モデル, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1201-1205, 2007.
- 8) 環境省: 干潟生態系に関する環境影響評価技術ガイド, 189p., 2008.
- 9) 黒木淳博, 森本剣太郎, 増田龍哉, 滝川清: 海岸堤防前面における地形変動と生物生息予測に関する一考察, 海洋開発論文集, 第24巻, pp. 723-728, 2008.
- 10) Defeo, O., McLachlan, A., Schoeman, D.S., Schlacher, T., Dugan, J., Jones, A., Lastra, M. and Scapini, F.: Threats to sandy beach ecosystems: A review, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 81, No. 1, pp. 1-12, 2008.
- 11) Schlacher, T.A., Schoeman, D.S., Dugan, J., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F. and McLachlan, A.: Sandy beach ecosystems: key features, sampling issues, management challenges and climate change impacts, *Marine Ecology*, Vol. 29, pp. 70-90, 2008.
- 12) Van der Wal, D., Herman, P.M.J., Forster, R.M., Ysebaert, T., Rossi, F., Knaeps, E., Plancke, Y.M.G. and Ides, S.J.: Distribution and dynamics of intertidal macrobenthos predicted from remote sensing: response to

- microphytobenthos and environment, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 367, pp. 57-72, 2008.
- 13) 園田吉弘, 滝川清, 斎藤孝, 青山千春: 主要 4 門の種数, 個体数による有明海底生生物生息環境の評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No.2, pp. I_1141-I_1145, 2011.
- 14) 今村正裕, Langston, W.J., O'Hara, S., Pope, N.: パイオメーカーを用いた沿岸生態系評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No.2, pp. I_1151-I_1155, 2011.
- 15) Ryu, J., Kim, H.C., Khim, J.S., Kim, Y.H., Park, J., Kang, D., Hwang, J.H., Lee, C.H. and Koh, C.H.: Prediction of macrozoobenthic species distribution in the Korean Saemangeum tidal flat based on a logistic regression model of environmental parameters, *Ecological Research*, Vol. 26, pp. 659-668, 2011.
- 16) Fujii, T.: Climate change, sea-level rise and implications for coastal and estuarine shoreline management with particular reference to the ecology of intertidal benthic macrofauna in NW Europe, *Biology*, Vol. 1, pp.597-616, 2012.
- 17) Puls, W., van Bernem, K.H., Eppel, D., Kapitza, H., Pleskachevsky, A., Riethmüller, R. and Vaessen, B.: Prediction of benthic community structure from environmental variables in a soft-sediment tidal basin (North Sea), *Helgoland Marine Research*, Vol. 66, pp. 345-361, 2012.
- 18) Schoeman, D.S., Schlacher, T.A. and Defeo, O.: Climate-change impacts on sandy-beach biota: crossing a line in the sand, *Global Change Biology*, Vol. 20, pp. 2383-2392, 2014.
- 19) Reed, D., van Wesenbeeck, B., Herma, P.M.J. and Meselhe, E.: Tidal flat-wetland systems as flood defenses: Understanding biogeomorphic controls, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 213, pp. 269-282, 2018.
- 20) Scapini, F., Degli, E.I. and Defeo, O.: Behavioral adaptations of sandy beach macrofauna in face of climate change impacts: A conceptual framework, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 225, 106236, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.05.018>, 2018.
- 21) 佐々真志, 渡部要一: 砂質干潟の生態土砂環境に果たすサクシヨンの役割—巣穴住活動/保水性の性能評価・設計指針—, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 45, No. 4, pp. 61-107, 2006.
- 22) Sassa, S. and Watabe, Y.: Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575, 2007.
- 23) Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T.: Burrowing criteria and burrowing mode adjustment in bivalves to varying geoenvironmental conditions in intertidal flats and beaches, *PLoS ONE*, Vol. 6, No.9, e25041, 2011.
- 24) 佐々真志, 渡部要一, 梁順普, 桑江朝比呂: 干潟・砂浜海岸の生物生態/地形動態に果たす地盤環境の役割—多種多様な生物住環境診断チャートと安定地形の最適設計—, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 52, No. 4, pp. 3-44, 2013.
- 25) Sassa, S. and Yang, S.: Role of geoenvironmental dynamics in the biodiversity of sandy beaches and sandflats: The ecohohabitat chart and its ecological implications, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, Vol. 219, pp. 278-290, 2019a.
- 26) Sassa, S. and Watabe, Y.: Persistent sand bars explained by geodynamic effects, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L01404, doi:10.1029/2008GL036230, 2009.
- 27) Watabe, Y. and Sassa, S.: Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation, *Marine Geology*, Vol. 252, pp. 79-88, 2008.
- 28) Sassa, S. and Watabe, Y.: Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 354, pp. 191-199, doi:10.3354/meps07236, 2008.
- 29) Kuwae, T., Miyoshi, E., Sassa, S. and Watabe, Y.: Foraging mode shift in varying environmental conditions by dunlin *Calidris alpina*, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 406, pp. 281-289, 2010.

- 30) Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T. : Ecological geotechnics: Role of waterfront geoenvironment as habitats in the activities of crabs, bivalves, and birds for biodiversity restoration, *Soils and Foundations*, Vol. 53, No.2, pp. 246-258, 2013.
- 31) Sassa, S., Yang, S., Watabe, Y., Kajihara, N. and Takada, Y. : Role of suction in sandy beach habitats and the distributions of three amphipod and isopod species, *Journal of Sea Research*, Vol. 85, pp. 336-342, 2014.
- 32) Sassa, S. and Yang, S.: Suction-induced habitat selection in sand bubbler crabs, *Royal Society Open Science*, Vol. 6, 190088, 2019b.
- 33) 竹山佳奈, 佐々真志, 梁順普, 渡辺啓太, 斎藤輝彦: 地盤環境を考慮したアサリ生育場の新たな維持・管理手法の開発と現地試験による実証, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No.2, pp. I_1093-I_1098, 2016.
- 34) 梁順普, 佐々真志: 沿岸底生生態—地盤環境動態統合評価予測プラットフォームの構築と適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 75, No.2, pp. I_1081- I_1086, 2019.
- 35) 梁順普, 佐々真志, 高田宜武: 潮差が異なる砂浜潮間帯に生息する底生端脚類の分布と地盤環境適合場の一般性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 74, No.2, pp. I_486-I_490, 2018.
- 36) Yang, S., Sassa, S. and Takada, Y.: Universality of the linkage between geoenvironment and the distributions of three *Haustorioides* amphipods: *H. japonicus*, *H. munsterhjelmi*, and *H. koreanus*, *Plankton & Benthos Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 170-179, 2019.
- 37) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 高田康平, 高田宜武, Sungtae Kim, Chae-Lin Lee, Jae-Sang Hong : 日韓の砂浜生態系におけるサクシオン—端脚類・等脚類の統一分析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 76, No. 2, pp. I_846- I_851, 2020.
- 38) 梁順普, 佐々真志, 工代健太, 高田康平, 高田宜武, Sungtae Kim, Chae-Lin Lee, Jae-Sang Hong : 潮差が異なる砂浜潮間帯に生息する底生等脚類の岸沖分布と地盤環境適合場の一般性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_1015- I_1020, 2020.
- 39) Seike, K., Shirai, K. and Kogure, Y. : Disturbance of shallow marine soft-Bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *PLoS ONE*, Vol. 8, No. 6, e65417, 2013.
- 40) 梁順普, 佐々真志, 渡辺啓太, 高田宜武: 高波イベントによる砂浜生物分布の変化と地盤環境適合場の一般性, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I_1058- I_1062, 2016.
- 41) 佐々真志, 梁順普, 渡辺啓太, 高田宜武: 台風イベントによる干潟生物分布の変化と地盤環境適合場の検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_1285- I_1290, 2017.
- 42) 梁順普, 佐々真志, 高田宜武: 砂浜地形変化による底生生物の岸沖分布変化に果たす地盤環境適合場の役割, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 75, No. 2, pp. I_545- I_550, 2019.
- 43) Yang, S., Sassa, S. and Takada, Y.: Cross-shore distributions of peracarid crustaceans after changes in beach morphology: the importance of suction as a key geoenvironmental variable, *Ecological Research*, Vol. 35, pp. 871-887, doi:10.1111/1440-1703.12151, 2020.
- 44) 国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所: 干潟造成技術マニュアル (Ver. 1) —成功事例に学ぶ干潟造成技術—, 2006.
- 45) 佐々真志, 渡部要一, 石井嘉一: 干潟と砂浜の保水動態機構と許容地下水位の解明, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 1151-1155, 2007.
- 46) 梁順普, 佐々真志, 梶原直人, 渡辺啓太: 砂浜及び干潟における実質飽和近傍域の簡易検定・評価手法の構築, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 73, pp. 636-641, 2017.
- 47) 佐々真志, 渡部要一, 梁順普: 多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 1226-1230, 2009.
- 48) 梁順普, 佐々真志, 渡部要一, 岩本裕之, 中瀬浩太: 生物住活動性能チャートによる自然・造成干潟の住み分

- け評価分析と検証, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp. I_986-I_990, 2011.
- 49) Takahashi, K., Hirose, T. and Kawaguchi, K.: The importance of intertidal sand-burrowing peracarid crustaceans as prey for fish in the surf-zone of a sandy beach in Otsuchi Bay, northeastern Japan, *Fisheries Science*, Vol. 65, No. 6, pp. 856-864, 1999.
- 50) Kaneko, K. and Omori, M.: Diel and tidal migration and predator-prey relationship of microbenthic animals in intertidal sandy beaches of Sendai Bay, northern Japan, *Benthos Research*, Vol. 58, No. 1, pp. 43-49, 2003.
- 51) Duarte, C., Navarro, J.M., Acuña, K. and Gómez, I.: Feeding preference of the sandhopper *Orchestoidea tuberculata*: the importance of algal traits, *Hydrobiologia*, Vol. 651, pp. 291-303, 2010.
- 52) Placyk Jr, J.S. and Harrington, B.A.: Prey abundance and habitat use by migratory shorebirds at coastal stopover sites in Connecticut, *Journal of Field Ornithology*, Vol. 75, No. 3, pp. 223-231, 2014.
- 53) Defeo, O. and McLachlan, A.: Patterns, processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 295, pp. 1-20, 2005.
- 54) Schlacher, T.A. and Thompson, L.: Environmental control of community organisation on ocean-exposed sandy beaches, *Marine and Freshwater Research*, Vol. 64, No. 2, pp. 119-129, 2013.
- 55) McLachlan, A. and Defeo, O.: *The Ecology of Sandy Shores*, Academic Press, 572p., 2018.
- 56) McLachlan, A.: Dissipative beaches and macroinfauna communities on exposed intertidal sands, *Journal of Coastal Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 57-71, 1990.
- 57) Brazeiro, A.: Relationship between species richness and morphodynamics in sandy beaches: what are the underlying factors? *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 224, pp. 35-44, 2001.
- 58) Brazeiro, A.: Geomorphology induces life history changes in invertebrates of sandy beaches: the case of the mole crab *Emerita analoga* in Chile, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, Vol. 85, pp. 113-120, 2005.
- 59) McLachlan, A. and Dorvlo, A.: Global patterns in sandy beach macrobenthic communities, *Journal of Coastal Research*, Vol. 21, No. 4, pp. 674-687, 2005.
- 60) Lastra, M., Huz, R., Sánchez-Mata, A.G., Rodil, I.F., Alerts, K., Beloso, S. and López, J.: Ecology of exposed sandy beaches in northern Spain: Environmental factors controlling macrofauna communities, *Journal of Sea Research*, Vol. 55, No. 2, pp. 128-140, 2006.
- 61) Defeo, O. and McLachlan, A.: Coupling between macrofauna community structure and beach type: a deconstructive meta-analysis, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 433, pp. 29-41, 2011.
- 62) Barboza, F.R. and Defeo, O.: Global diversity patterns in sandy beach macrofauna: a biogeographic analysis, *Scientific Reports*, Vol. 5, 14515, 2015.
- 63) 梶原直人, 高田宜武: ナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* の潜砂行動におよぼす飽和水位の影響に関する実験的研究, *水産工学*, Vol. 45, pp. 151-156, 2008.
- 64) Kaneko, K. and Omori, M.: Life history and utilization of the beach face slope by the sandy beach isopod *Excirolana chiltoni* in Sendai Bay, northern Japan, *Crustacean Research*, Vol. 34, pp. 27-39, 2005.
- 65) Takada, Y., Kajihara, N., Mochizuki, S. and Murakami, T.: Effects of environmental factors on the density of three species of peracarid crustaceans in micro-tidal sandy shores in Japan, *Ecological Research*, Vol. 30, pp. 101-109, 2015.
- 66) Bally, R.: The respiration of the marine isopod *Excirolana natalensis* (Flabellifera; Cirolanidae) from an exposed sandy beach, *Comparative Biochemistry and Physiology*, Vol. 75, pp. 625-629, 1983.
- 67) Jo, Y.W. : Taxonomic studies on Dogielinotidae (Crustacea-Amphipods) from the Korean coasts, *Bijdragen tot de Dierkunde*, Vol. 58, No. 1, pp. 25-46, 1988.

- 68) Jaramillo, E., McLachlan, A. and Coetzee, P.: Intertidal zonation patterns of macroinfauna over a range of exposed sandy beaches in South-Central Chile, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 101, pp. 105-118, 1993.
- 69) 上平幸好：北太平洋西岸におけるナミノリソコエビ科端脚類の地理的分布，函館大学論究，Vol. 31, pp. 91-99, 2000.
- 70) Lozoya, J.P., Gómez, J. and Defeo, O.: Modelling large-scale effects of estuarine and morphodynamic gradients on distribution and abundance of the sandy beach isopod *Excirrolana armata*, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 87, No. 3, pp. 472-478, 2010.
- 71) Takada, Y., Sakuma, K., Fujii, T. and Kojima, S.: Phylogeography of the sandy beach amphipod *Haustorioides japonicus* along the Sea of Japan: Paleogeographical signatures of cryptic regional divergences, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 200, pp. 19-30, 2018.
- 72) Yu, O.H., Soh, H.Y. and Suh, H.L.: Seasonal zonation patterns of benthic amphipods in a sandy shore surf zone of Korea, *Journal of Crustacean Biology*, Vol. 22, No. 2, pp. 459-466, 2002.
- 73) Lambe, T.W. and Whitman, R.V.: Soil mechanics, John Wiley & Sons, New York, 547p., 1979.
- 74) Aubrey, D.C.: Beach changes on coasts with different wave climates. In A. McLachlan, & T. Erasmus, (Eds.) *Sandy Beaches as Ecosystems: Vol. 19. Developments in Hydrobiology* (pp. 63-85). Dordrecht, Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-94-017-2938-3_4, 1983.
- 75) Otvos, E.G.: Beach aggradation following hurricane landfall: impact comparisons from two contrasting hurricanes, Northern Gulf of Mexico, *Journal of Coastal Research*, Vol. 20, No. 1, pp. 326-339, 2004.
- 76) Switzer, A.D. and Jones, B.G.: Setup, deposition, and sedimentary characteristics of two storm overwash deposits, Abraham Bosom Beach, Southeastern Australia, *Journal of Coastal Research*, Vol. 24, No. 1A, pp. 189-200, doi:10.2112/05-0487.1, 2008.
- 77) Qi, H., Cai, F., Lei, G., Cao, H. and Shi, F.: The response of three main beach types to tropical storms in South China, *Marine Geology*, Vol. 275, pp. 244-254, 2010.
- 78) Campmas, L., Bouchette, F., Meule, S., Petitjean, L., Sous, D., Liou, J.Y., Leroux-Mallouf, R., Sabatier, F. and Hwung, H.H.: Typhoons driven morphodynamics of the Wan-Tzu-Liao sand barrier (Taiwan), *Coast Engineering proceedings, Korea*, Vol. 34, pp. 1-13, 2014.
- 79) Rees, E.I.S., Nicholaidou, A. and Laskaridou, P.: The effects of storms on the dynamics of shallow benthic associations. In B.F. Keegan, P.J.S. Boaden, & P.O. Ceidigh (Eds.). *Biology of Benthic Organisms* (pp. 465-474). Galway, Ireland: Pergamon Press, 1977.
- 80) Yeo, R.K. and Risk, M.J.: Intertidal catastrophes: effect of storms and hurricanes on intertidal benthos of the Minas Basin, Bay of Fundy, *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, Vol. 36, No. 6, pp. 667-669, 1979.
- 81) Dobbs, F.C. and Vozarik, J.M.: Immediate effects of a storm on coastal infauna, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 11, No. 3, pp. 273-279, 1983.
- 82) Posey, M., Lindberg, W., Alphin, T. and Vose, F.: Influence of storm disturbance on an offshore benthic community, *Bulletin of Marine Science*, Vol. 59, No. 3, pp. 523-529, 1996.
- 83) Gallucci, F. and Netto, S.A.: Effects of the passage of cold fronts over a coastal site: an ecosystem approach, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 281, pp. 79-92, 2004.
- 84) Alves, E.S. and Pezzuto, P.R.: Effects of cold fronts on the benthic macrofauna of exposed sandy beaches with contrasting morphodynamics, *Brazilian Journal of Oceanography*, Vol. 57, No. 2, pp. 73-96, 2009.
- 85) Harris, L., Nel, R., Smale, M. and Schoeman, D.: Swashed away? Storm impacts on sandy beach macrofaunal communities, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 94, No. 3, pp. 210-221, doi:10.1016/j.ecss.2011.06.013, 2011.
- 86) Filho, O.A.N. and Lana, P.C.: Short-term stability of estuarine benthic assemblages: are storms pattern-defining events?, *Zoologia (Curitiba)*, Vol. 30, No. 3, pp. 266-272, doi:10.1590/S1984-46702013000300003, 2013.
- 87) 光田 寧, 藤井 健, 塚本 修: 日本海における季節風

- 時の波浪予知 (1) —海上風の推定— . 京大防災研究所年報, Vol. 26 (B-2), pp. 587-598, 1983.
- 88) 長沼光亮 : 生物の生息環境としての日本海, 日水研報告, Vol. 50, pp. 1-42, 2000.
- 89) Takada, Y., Kajihara, N., Suzuki, Y., Yamahira, K., Yang, S. and Sassa, S.: Estimates of mortality in sandy beach populations of *Haustorioides japonicas* (Ampipoda: Crustacea) and *Exciroilana Chiltoni* (Isopoda: Crustacea) during winter storm seasons. *Plankton and Benthos Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 180-188, doi:10.3800/pbr.14.180, 2019.
- 90) Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N.J., Saveliev, A.A. and Smith, G.M.: *Mixed effects models and extensions in ecology with R*, New York: Springer, 2009.
- 91) Brooks, M.E., Kristensen, K., van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A., Skaug, H.J., Maechler, M. and Bolker, B.M.: glmmTMB balances speed and flexibility among packages for Zero-inflated Generalized Linear Mixed Modeling, *The R Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 378-400. doi:10.32514/RJ-2017-066, 2017.
- 92) R Core Team.: *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/>, 2019.
- 93) 日本地下水学会 : 地下水シミュレーション, 技報堂出版, 232p., 2010.
- 94) van Genuchten, M. Th.: A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898, 1980.
- 95) 地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, 丸善出版株式会社, 224p., 2004.
- 96) Chapuis, R. P.: Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 41, No. 5, pp. 787-795, 2004.

付録 A

ナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ及びヒゲナガハマトビムシの巣穴に対する一般化線形モデル(GLM)と一般化線形混合モデル(GLMM)のDelta-AIC 値

Model No.	Model	ナミノリ ソコエビ	ヒメスナ ホリムシ	ヒゲナガハマ トビムシの巣穴
Ordinary GLM				
1	Site + Distance + Distance ²	108.8	11.9	235.8
2	Site + Suction + Suction ²	49.3	0	58
3	Site + Height + Height ²	64.7	18.3	379.2
4	Site + Slope + Slope ²	70.5	12.4	428.3
Hurdle GLM				
5	Site, Distance + Distance ²	99.7	14.3	594.8
6	Site + Distance + Distance ² , Distance + Distance ²	96.2	17.9	577.2
7	Site, Suction + Suction ²	25.3	27.2	77.7
8	Site + Suction + Suction ² , Suction + Suction ²	28.8	26.1	52.7
9	Site, Height + Height ²	69.2	43.7	462.4
10	Site + Height + Height ² , Height + Height ²	66.0	45.3	480.9
11	Site, Slope + Slope ²	107.5	26.1	551.6
12	Site + Slope + Slope ² , Slope + Slope ²	88.7	29	537.4
Hurdle GLMM				
13	Site + (1 Date), Distance + Distance ²	100.2	16.3	595.4
14	Site, Distance + Distance ² + (1 Date)	73.4	15.9	228.2
15	Site + (1 Date), Distance + Distance ² + (1 Date)	73.9	17.9	228.8
16	Site + Distance + Distance ² + (1 Date), Distance + Distance ²	98.2	19.9	574.4
17	Site + Distance + Distance ² , Distance + Distance ² + (1 Date)	69.9	19.5	210.6

18	Site + Distance + Distance ² + (1 Date), Distance + Distance ² + (1 Date)	71.9	21.5	207.8
19	Site + (1 Date), Suction + Suction ²	25.8	29.2	78.3
20	Site, Suction + Suction ² + (1 Date)	0	18.7	25
21	Site + (1 Date), Suction + Suction ² + (1 Date)	0.5	20.7	25.6
22	Site + Suction + Suction ² + (1 Date), Suction + Suction ²	29.2	28.1	53
23	Site + Suction + Suction ² , Suction + Suction ² + (1 Date)	3.5	17.6	0
24	Site + Suction + Suction ² + (1 Date), Suction + Suction ² + (1 Date)	3.9	19.6	0.3
25	Site + (1 Date), Height + Height ²	69.7	45.7	463
26	Site, Height + Height ² + (1 Date)	43.9	26.5	255.2
27	Site + (1 Date), Height + Height ² + (1 Date)	44.4	28.5	255.8
28	Site + Height + Height ² + (1 Date), Height + Height ²	66.9	47.3	444
29	Site + Height + Height ² , Height + Height ² + (1 Date)	40.7	28	240.7
30	Site + Height + Height ² + (1 Date), Height + Height ² + (1 Date)	41.7	30	236.8
31	Site + (1 Date), Slope + Slope ²	108.0	28.1	552.2
32	Site, Slope + Slope ² + (1 Date)	101.3	22.2	252.7
33	Site + (1 Date), Slope + Slope ² + (1 Date)	101.8	24.2	253.3
34	Site + Slope + Slope ² + (1 Date), Slope + Slope ²	90.7	31	536.6
35	Site + Slope + Slope ² , Slope + Slope ² + (1 Date)	82.4	25.1	238.5
36	Site + Slope + Slope ² + (1 Date), Slope + Slope ² + (1 Date)	84.4	27.1	237.7
37	Null (intercept only)	139.9	42.1	655.2
Distribution		Negative binomial	Poisson	Negative binomial
Number of observations		460	460	910

港湾空港技術研究所報告 第59巻 第3号

2020. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2020) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Processes of internal erosion, cavity formation and collapse under various soil and hydraulic conditions with their countermeasure using geotechnical filter
Kenta KUDAI • Shinji SASSA • Soonbo YANG • Kouhei TAKADA • Kojiro SUZUKI..... 1
2. Development and application of integrated platform for predicting and evaluating coastal benthic ecology-geoenvironmental dynamics
Soonbo YANG • Shinji SASSA • Kenta KUDAI • Kouhei TAKADA.....21