

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

Vol.52 No.4 December 2013

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

# 港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 52 卷 第 4 号 (Vol. 52, No. 4) , 2013 年 12 月 (December 2013)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 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－  
.....佐々真志, 渡部要一, 梁順普, 桑江朝比呂 ..... 3  
(Role of Geoenvironment in the Benthic Ecology and Morphodynamics of Intertidal Flats and Beaches  
-Ecohabitat Chart and Optimal Design of Dynamically Stable Sandbars-  
.....Shinji SASSA, Yoichi WATABE, Soonbo YANG, Tomohiro KUWAE)
  
2. 静的圧入締固め工法の液状化抑制効果に関する研究  
.....高野大樹, 西村聡, 森川嘉之, 高橋英紀 ..... 45  
(The effect of compaction grouting as a countermeasure against liquefaction  
.....Daiki TAKANO, Satoshi NISHIMURA, Yoshiyuki MORIKAWA, Hidenori TAKAHASHI)
  
3. W/O エマルジョンを形成した水-重油系の流動特性と管摩擦損失の制御手法に関する研究  
.....藤田勇, 松崎義孝 ..... 75  
(Rheological Behavior of W/O Emulsion of Water-Heavy Oil System and  
Friction Loss Reduction Methods for its Flow in a Pipe  
.....Isamu FUJITA, Yoshitaka MATSUZAKI)

# 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—

佐々 真志\*・渡部 要一\*\*・梁 順普\*\*\*・桑江 朝比呂\*\*\*\*

## 要 旨

本報告は、水と地盤と生態を融合した新たな学際領域として、筆者らが先駆的に開拓・推進している生態地盤学の展開を通じて、干潟および砂浜海岸における多種多様な生物生態ならびに地形動態に果たす地盤環境の役割を体系的に解明し、対応する工学基盤・指針を提示することを目的としている。日本各地の現地観測・調査、各種の生態地盤実験、概念モデルおよび一連の解析・分析を通じて、得られた主な知見は次のようである。

1) 干潟・砂浜に生息する典型的な二枚貝種 (アサリとフジノハナガイ) を対象として、土砂環境動態に対する 2 つの新たな潜砂基準と潜砂適応の存在を見出し、その発現機構を解明した。そして、これらの定量的な基準が、稚貝から成貝にかけての二枚貝の空間分布ならびに行動・形状適応に果たす役割とその重要性について明らかにした。2) 巣穴底生生物は、巣穴発達のための最適・限界サククション場を探知する“生物センサ”を有し、地表サククションの空間勾配に基づいて、住活動に適した場を自ら選択して巣穴活動を行うことを明らかにした。3) サククションは、砂浜潮間帯の飽和・不飽和、緩密、硬さ軟らかさ等の多様な生物住環境の発現を支配していること、そして、異なる 3 種の小型甲殻類の生息限界域と高密度域の分布を統一的に規定しうることを明らかにした。4) 多様な生物住活動の適合土砂環境場と限界土砂環境場の両者が生物種ごとに存在することを世界で初めて明らかにした。そして、同適合場と限界場の生物種間の複雑な相互関係を浮き彫りにした生物住環境診断チャートを構築し、各地の干潟生物の生息分布と住み分けの実態が、同チャートときわめて良く整合していることを明らかにした。5) 筆者らが新たに見出した潮間帯砂州の動的安定原理を、浅場造成砂州において詳しく検証した結果、同原理に基づいて予測した安定地盤高において、砂州地形の自律安定性が見事に発現することを明らかにし、これに基づく浅場造成高・覆砂厚の最適設計を提示した。

以上の知見は、従来、困難であった多様な生物種に対応した生物住環境の評価・モニタリング・管理を実現可能とし、併せて提示した生物多様性と地形安定の両立を実現しうる工学指針は、今後の干潟・浅場造成事業において広く活用されることが期待される。

キーワード：干潟，砂浜，地盤環境，生物多様性，地形安定

---

\* 地盤研究領域動土質チームリーダー

\*\* 地盤研究領域長

\*\*\* 地盤研究領域土質研究チーム元特別研究員 (現韓国济州大学研究員)

\*\*\*\* 沿岸環境研究領域沿岸環境研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5054 Fax：046-844-4577 e-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

## **Role of Geoenvironment in the Benthic Ecology and Morphodynamics of Intertidal Flats and Beaches -Ecohabitat Chart and Optimal Design of Dynamically Stable Sandbars-**

**Shinji SASSA\***  
**Yoichi WATABE\*\***  
**Soonbo YANG\*\*\***  
**Tomohiro KUWAE\*\*\*\***

### **Synopsis**

The present study aims to clarify the role of geoenvironment in the benthic ecology and morphodynamics of intertidal flats and beaches on the basis of a new cross-disciplinary research field called Ecological Geotechnics. The principal findings and conclusions obtained through the combined use of field observations/surveys, laboratory experiments, conceptual and theoretical model and analysis are as follows.

1) It has revealed two new burrowing criteria and burrowing mode adjustment in bivalves to varying geoenvironmental conditions in intertidal flats and beaches, highlighting their mechanics, as well as their role and implications, in the adult-juvenile spatial distributions and behavioral/morphological adaptations there.

2) It is found that the burrowing benthos has a capability to detect suction gradient and actively selects the suitable geoenvironments for their burrowing, thereby generating patch formation.

3) Suction governs various geophysical states of sandy beach sediments, and may uniquely determine the peak and critical area of densities for three dominant species inhabiting different coasts.

4) There exist suitable and critical geoenvironmental conditions for the burrowing activities of diverse species, which are found to differ considerably between species, body sizes and weights. This has led to the development of an ecohabitat chart, which is found to be well consistent with the distributions and habitat selections of diverse benthos at various natural and artificial intertidal flats.

5) The feedback between sediment transport and the suction dynamics effects has been found to play a crucial role in not only natural but also artificially reclaimed sandbars in intertidal zones, giving rise to an optimal design of such dynamically stable sandbars as habitats with diverse ecological activity.

These findings are therefore expected to facilitate a new horizon of the performance-based geoenvironmental assessment and management for the diverse species. The developed design for achieving both biodiversity and morphodynamic stability may be used widely in future reclamation projects for intertidal flats and shallow sea.

**Key Words:** intertidal flat, sandy beach, geoenvironment, biodiversity, morphodynamic stability.

---

\* Head, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Field  
\*\* Director, Geotechnical Engineering Field  
\*\*\* Formerly researcher, Soil Mechanics Group, Geotechnical Engineering Field  
\*\*\*\* Head, Coastal and Estuarine Environment Group, Coastal and Estuarine Environment Field  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone: +81-468-445054 Fax: +81-468-444577 e-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 序論 .....	7
2. 干潟および砂浜の土砂環境動態に対する二枚貝の潜砂基準と潜砂適応 .....	7
2.1 はじめに .....	7
2.2 干潟および砂浜の土砂物理環境調査と二枚貝の潜砂実験 .....	8
2.3 調査・実験結果 .....	11
2.4 考察 .....	14
2.5 まとめ .....	16
3. 巢穴底生生物の土砂環境選択行動と分布形成機構 .....	17
3.1 はじめに .....	17
3.2 巢穴底生生物の土砂環境選択実験と現地調査 .....	17
3.3 実験・調査結果と考察 .....	18
3.4 まとめ .....	21
4. 砂浜海岸の生物住環境と岸沖生物分布に果たすサクシヨンの役割 .....	21
4.1 はじめに .....	21
4.2 砂浜海岸における土砂物理環境／底生生物分布の一体調査と室内試験 .....	21
4.3 調査・試験分析結果と考察 .....	22
4.4 まとめ .....	25
5. 多種多様な生物住環境診断チャートの作成と検証 .....	25
5.1 はじめに .....	25
5.2 多種多様な生物住活動性能実験と生物住環境診断チャート .....	25
5.3 自然・造成干潟における土砂物理環境／底生生物分布の一体調査と室内試験 .....	27
5.4 調査・試験分析結果と考察 .....	28
5.5 まとめ .....	30
6. 潮間帯砂州地形の動的安定原理と覆砂・浅場造成高の最適設計 .....	30
6.1 はじめに .....	30
6.2 潮間帯砂州地形の動的安定原理 .....	31
6.3 浅場造成した干潟砂州の現地調査，室内試験と解析 .....	36
6.4 調査・試験・解析結果と考察 .....	36
6.5 まとめ .....	38
7. 結論 .....	38
謝辞 .....	39
参考文献 .....	39
記号表 .....	43



## 1. 序論

大気、海、地盤が出会う場である干潟は、豊かな底生生物を育み高い水質浄化能を有する沿岸自然環境のシンボリック的存在である（国土交通省港湾局, 2003）。そのため、生態系や水質・水理環境を対象として、国内外において生態学、海岸工学、水質化学等の分野から活発に研究がなされてきており、主に生物の食活動や水循環過程について数多くの知見が蓄積されている。しかし、底生生物の住環境を担う地盤表層の土砂環境については、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、干潟地盤表層の土砂環境場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、土中水分張力を表すサクションを核とした土砂環境動態が、多様な底生生物の住環境の時空間変化をもたらす本質的な役割を果たしていること、ならびに、生物住活動と土砂物理環境の間に密接な関わりがあることを世界に先駆けて解明し、工学・理学・生態学の学際新領域“生態地盤学”を開拓・推進している（佐々・渡部, 2005, 2006a,b, 2007, Sassa and Watabe, 2007, 2008, 2009; 佐々ら, 2007, 2008, 2009a,b, 2010a,b, 2011, 梁ら, 2011, Sassa et al., 2011, 2013）。

本報告では、このような生態地盤学の展開によって、干潟および砂浜海岸における多種多様な生物生態ならびに地形動態における地盤環境の役割を体系的に明らかにし、関わる工学基盤・指針を提示することを目的としている。

潮間帯土砂に生息する底生生物の巣穴形成や潜砂に代表される住活動は、生命活動の本源的要素となっており、餌を採る食活動や繁殖活動と同様に基本的かつ重要なものである。それゆえ、生物住活動の性能は、潮間帯の生物種の分布や生物群集を形成する上で重要な要因となっている（Icely and Jones, 1978; McLachlan, 1990; McLachlan et al., 1993; Thrush et al., 1996; 和田, 2002; Dugan et al., 2004; Compton et al., 2009）。個々の生物種の住活動の性能は、体型や体長（McLachlan et al., 1995; Dugan et al., 2000）、土砂の粒度（Alexander et al., 1993; Nel et al., 2001; Huz et al., 2002）、温度（Donn and Els, 1990; Eshky et al., 1995; 櫻井泉・瀬戸, 1996; Przeslawski et al., 2009）、塩分（Mann, 1988）、地質化学（Cummins et al., 2009）や潮間帯の波の遡上に関係した地形動態（Brazeiro, 2005; 越川・田中, 2006）に影響を受けうる。また、流線形の体を有する小型種は、動的な波の遡上条件に最も適しているといわれている（McLachlan et al., 1995）。

潮間帯土砂内部に生きる底生生物にとって、時間的空間的に顕著に変化する土砂内部の物理過程は、特に住活動が

土砂の中で行われる物理行動であることから、住活動の形態および住活動条件に重大な影響をもたらしている（Sassa and Watabe, 2007; 2008）。しかし、従来、底生生物の活動や分布に影響を及ぼす物理環境は、主に、潮汐・波・流れ等の土砂上の水理過程であると考えられてきた（McLachlan, 1990; 柿野ら, 1991; McLachlan et al., 1993; 1995; Dugan et al., 2000; Beukema and Vlas, 1989; Young et al., 1996; Norkko et al., 2001; Hunt, 2005）。また、波の遡上に伴う水理動態は、砂浜の底生生物の環境適応を支配しているとされてきた（Defeo and McLachlan, 2005）。砂や泥などの土砂の種類も、底生生物の分布と関連づけられている（Thrush et al., 1996; Compton et al., 2009）。しかし、生物息場を担う土砂内部の物理過程に関する理解が一般的に欠如してきたために（Sassa and Watabe, 2008）、底生生物の土砂物理環境に対する応答は、上述の水理環境に対する応答に比べて、未知な部分が多く残されてきた。

筆者らは、近年、潮汐による地下水位変動にともなう大気圧に比した負の間隙水圧を表すサクションの動態が、生物住環境を担う干潟土砂の間隙・剛性・硬さの時間的・空間的变化を支配していることを解明し、上記隘路を突破した（佐々・渡部, 2006b; Sassa and Watabe, 2007）。このようなサクション動態の効果は、干潟の地形動態（Sassa and Watabe, 2009）、ならびに、干潟の砂質・泥質・砂泥質層状地盤の堆積構造（Watabe and Sassa, 2008, 2012; 渡部ら, 2010）を形成する上でも、重要な役割を果たしていることを明らかにしている。このような潮間帯地盤の顕著な土砂物理の理解によって、干潟における土砂物理環境と生物生態の関わりを詳しく調べることが可能となり、砂質干潟の典型的な巣穴底生生物であるコメツキガニの住活動の臨界・最適・限界土砂環境条件の存在を解明するとともに（Sassa and Watabe, 2008）、干潟に飛来するシギ類の代表種であるハマシギにおいてサクションの発達性状による採餌活動の適合・限界土砂環境条件が存在することを明らかにしている（佐々ら, 2008; Kuwae et al., 2010; 桑江・三好, 2012）。

## 2. 干潟・砂浜の土砂環境動態に対する二枚貝の 潜砂基準と潜砂適応

### 2.1 はじめに

本章では、上述を背景として、干潟・砂浜の土砂環境動態が、異なる形状や大きさの二枚貝の応答において重要な役割を果たしていることを示す。二枚貝の環境応答は、水理条件や土砂の種類および粒度に関連して広く研究がなされてきたが（McLachlan, 1990; McLachlan et al., 1993;

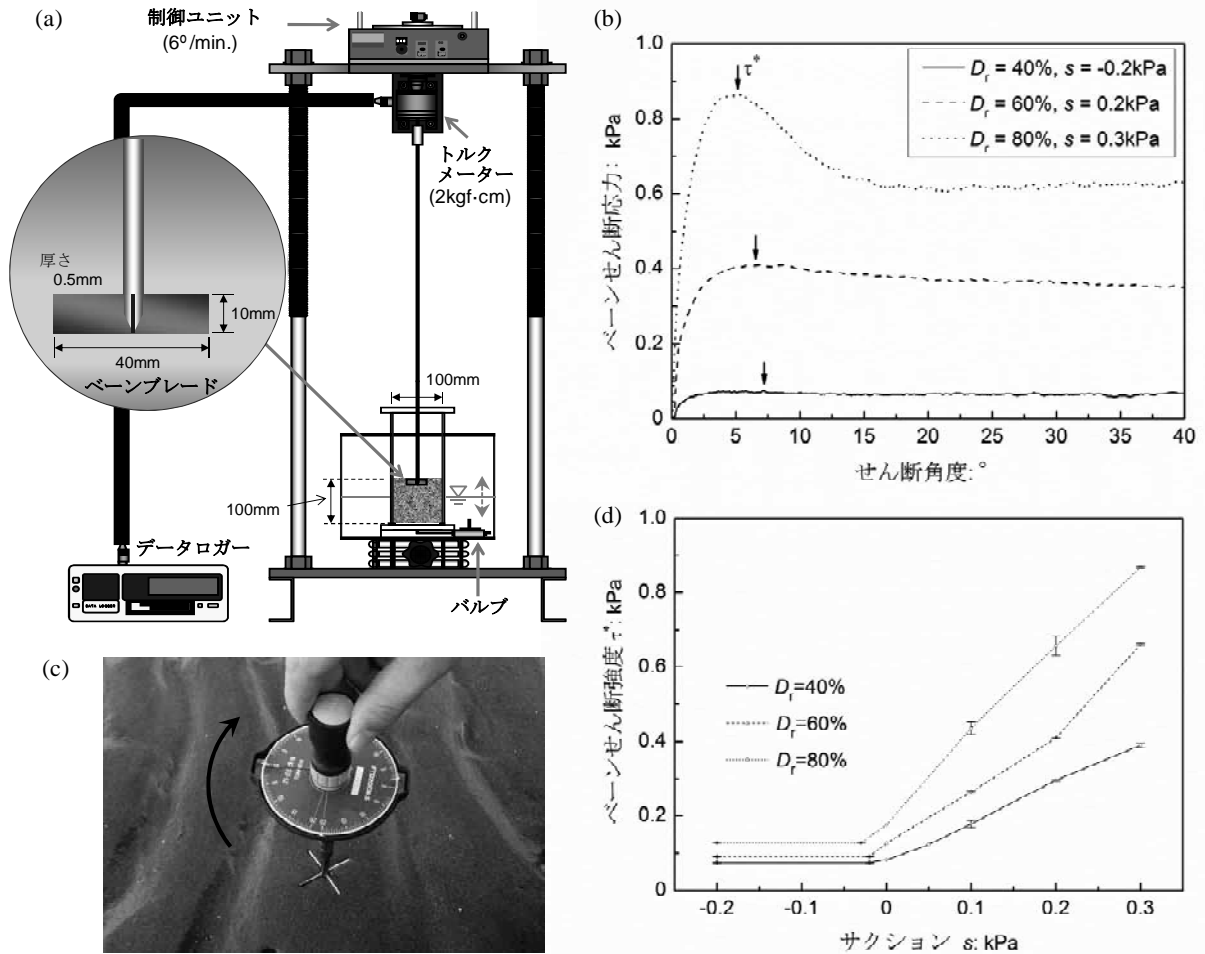


図-1 現地および室内ベーンせん断試験による表層土砂硬さの計測。(a) 室内ベーンせん断システム, (b) ベーンせん断応力とせん断角度の関係, (c) 現地ベーンせん断試験, (d) ベーンせん断試験結果 (平均値 $\pm$ 標準誤差),

Thrush et al., 1996; Dugan et al., 2004; Compton et al., 2009; McLachlan et al., 1995; Alexander et al., 1993; Nel et al., 2001; Huz et al., 2002; Beukema and Vlas, 1989; Young et al., 1996; Norkko et al., 2001; Hunt, 2005; Defeo and McLachlan, 2005, 2011), 生物生息場を担う地盤表層の土砂環境動態が二枚貝応答に果たす役割については, 理解が進んでおらず未解明に留まっていた。ここでは, 干潟・砂浜に生息する典型的な二枚貝の応答と関連する土砂物理環境条件の関わりについて明らかにする。本目的のために, 現地計測機器とともに, 室内の新たな高精度計測システムを活用している。

二枚貝の住活動は, 巣穴の形成を伴わない潜砂であり, カニやゴカイの住活動と基本的に異なっている。特定の水管長を有する二枚貝にとって, 鉛直に潜砂することは, 傾斜状態の潜砂に比べてより深い重心点となるため, 土砂内部での安定性が最大化され, 表面輸送・流されてしまうリスク (Ratcliffe et al., 1981) や, 外敵にさらされるリスク (Tallqvist, 2001), および, 直射日光による温度上昇のリス

ク (Johnson, 1965) を最小化することができる。以下では, 本研究の現地観測・調査と室内制御実験および概念モデルによって, 干潟・砂浜の土砂環境動態に対する二枚貝の潜砂基準ならびに潜砂適応の存在を明らかにし, 稚貝から成貝にかけて二枚貝の空間分布や環境適応の発現機構について定量的に解明する。

## 2.2 干潟および砂浜の土砂物理環境調査と二枚貝の潜砂実験

本研究で対象とする二枚貝は, アサリおよびフジノハナガイである。アサリは, 砂質干潟に生息し, 国内のみならず海外においても, 重要な水産資源となっている (Yokoyama et al., 2005; Tamaki et al., 2008; Vincenzi et al., 2006; Dang et al., 2010)。フジノハナガイは, 砂浜の潮間帯に生息する二枚貝であり, これまで, 波の遡上や土砂の粒径の影響に着目して研究がなされてきている (McLachlan et al., 1995; Nel et al., 2001; Huz et al., 2002)。



表-1 稚貝から成貝までのアサリの潜砂実験プログラム

水位/ 地下水位	サクシオン <i>s</i>	相対密度 <i>D<sub>r</sub></i>	ベーンせん断 強度 $\tau'$	殻長 <i>L</i>				
				4-6mm	10-12mm	19-21mm	29-31mm	49-51mm
mm	kPa	%	kPa					
20 (40) <sup>a</sup>	-0.2 (-0.4)	40	0.07	n=8 a=8	n=4 a=4	n=4 a=4	n=3 a=2, b=1	n=4 a=1, b=3
0	0	40	0.08			n=4 a=4	n=3 a=2, b=1	
20 (40) <sup>a</sup>	-0.2 (-0.4)	60	0.09	n=8 a=7, b=1	n=4 a=4	n=4 a=4	n=4 a=2, b=2	n=4 b=4
-5	0.05	40	0.12		n=4 a=2, b=2	n=4 a=1, b=3		
20 (40) <sup>a</sup>	-0.2 (-0.4)	80	0.13	n=8 a=1, b=7	n=4 a=4	n=4 a=2, b=2	n=4 a=2, b=2	n=4 b=2, c=2
0	0	60	0.13	n=8 a=1, b=7	n=4 a=2, b=2	n=4 b=4	n=4 b=3, c=1	
0	0	80	0.18	n=8 b=5, c=3	n=4 a=1, b=3	n=4 b=2, c=2	n=4 a=1, b=1, c=2	n=4 c=4
-10	0.1	40	0.18	n=8 c=8	n=8 b=7, c=1	n=4 b=2, c=2	n=4 c=4	
-5	0.05	60	0.20		n=8 b=7, c=1	n=4 b=3, c=1		
-8	0.08	60	0.24		n=8 b=5, c=3			
-15	0.15	40	0.24		n=8 c=8	n=4 b=1, c=3		
-3	0.03	80	0.25		n=8 b=1, c=7			
-10	0.1	60	0.26		n=8 c=8	n=4 c=4		
-20	0.2	40	0.30			n=4 c=4	n=4 c=4	
-5	0.05	80	0.31		n=8 c=8	n=4 c=4		
-30	0.3	40	0.39			n=4 c=4		
-20	0.2	60	0.41			n=4 c=4		
-10	0.1	80	0.44			n=4 c=4		
-30	0.3	60	0.66			n=4 c=4		

気温: 20.2 ± 0.2 °C, 水温: 19.1 ± 0.4 °C, 塩分: 2.7%, ( ): L = 30mm, 50mmの場合

n: 各ケースの個体数, a: 鉛直完全潜砂, b: 傾斜・部分潜砂, c: 潜砂不可。

現地調査の場所は、野島干潟と白川河口干潟の2つの砂質干潟と由比ヶ浜と九十九里浜の2つの砂浜である。これらの4つの現地の潮間帯土砂は、主に、中央粒径が0.14~0.27mmの細砂であり、シルト・粘土分は砂質干潟で25%未満、砂浜では1%以下であった。

室内潜砂実験を実施するために、野島干潟、盤州干潟および風蓮湖干潟の3つの干潟において、稚貝から成貝までのアサリを採取した。殻長は、2.5mmから52mmで、1個体の湿重量は、0.004gから31.9gの範囲であった。この湿重量 *w* は殻長 *L* の単一の関数で表され、その関係は次のようであった。 $w(L) = 1.860 \times 10^{-4} \cdot L^{3.043}$ ,  $r^2 = 0.99$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 1083$ 。ここに、*r* は相関係数、*p* は有意確率、*n* は個体数である。フジノハナガイは由比ヶ浜で採取し、殻長は、3.7mm~15mm、湿重量は、0.01gから0.8gの範囲で、それらの関係は、上述のアサリと同様に次のようであった。 $w(L) = 1.853 \times 10^{-4} \cdot L^{3.026}$ ,  $r^2 = 0.963$ ,  $p < 0.0001$ ,  $n = 604$ 。

以下では、潮間帯土砂の物理状態を表すいくつかの重要な物理量について先ず述べる。

サクシオンは、土砂内部の水分張力を表し (Bear, 1979)、次式に示すように、大気圧に比した負の間隙水圧によって定義される。

$$S = u_a - u_w \quad (1)$$

ここに、*u<sub>a</sub>* は大気圧、*u<sub>w</sub>* は土砂の間隙水圧である。本定義により、サクシオンは地下水位においてゼロとなる。

土砂の間隙状態は、間隙率 *n* と関連した間隙比 *e* によって表される。

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (2)$$

表-2 フジノハナガイの潜砂実験プログラム

水位/ 地下水位	サクシオン <i>s</i>	相対密度 <i>D<sub>r</sub></i>	ベーンせん断 強度 $\tau^*$	殻長 <i>L</i>
mm	kPa	%	kPa	10-11mm
20	-0.2	40	0.07	n=4 a=4
20	-0.2	60	0.09	n=4 a=4
-5	0.05	40	0.12	n=4 a=4
20	-0.2	80	0.13	n=4 a=4
0	0	60	0.13	n=4 a=4
0	0	80	0.18	n=4 a=1, b=3
-10	0.1	40	0.18	n=4 a=2, b=2
-5	0.05	60	0.20	n=4 a=1, b=3
-15	0.15	40	0.24	n=4 b=4
-10	0.1	60	0.26	n=4 b=3, c=1
-20	0.2	40	0.30	n=4 b=2, c=2
-5	0.05	80	0.31	n=4 b=3, c=1
-15	0.15	60	0.34	n=4 b=2, c=2
-25	0.25	40	0.34	n=4 b=1, c=3
-7	0.07	80	0.36	n=4 c=4
-17	0.17	60	0.37	n=4 c=4
-30	0.3	40	0.39	n=4 c=4

気温: 20.4 ± 0.2 °C, 水温: 18.6 ± 0.2 °C, 塩分: 2.7%

n: 各ケースの個体数. a: 鉛直完全潜砂, b: 傾斜・部分潜砂, c: 潜砂不可.

土砂の緩密状態は、相対密度  $D_r$  によって表される。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3)$$

この際、 $e_{\max}$  は土砂の最も緩い状態に対応する最大間隙比を、 $e_{\min}$  は最も密な状態に対応する最小間隙比を表す (Lamb and Whitman, 1979)。このため、 $D_r$  値は土砂のパッキング状態を評価するための統一的な指標となっている。

潮間帯表層土砂の硬さは、ベーンせん断強度によって評価することができる (Amos et al., 1988; Sassa and Watabe, 2007, 2008; Kuwae et al., 2010)。ベーンせん断試験の重要な特徴は、表層土砂に極めて細いベーンブレードを挿入し (図-1 (a), (c))、これを回転させた際の水平せん断に対する土砂の最大抵抗  $\tau^*$  (図-1 (b)) を計測することによって、土砂の不攪乱状態の硬さを評価できることである (図-1)。このベーンせん断強度  $\tau^*$  によって評価した土砂硬さは、カニの巣穴の発達を支配していることや鳥による採餌行動の変化と密接に関わっていることが明らかとなっている

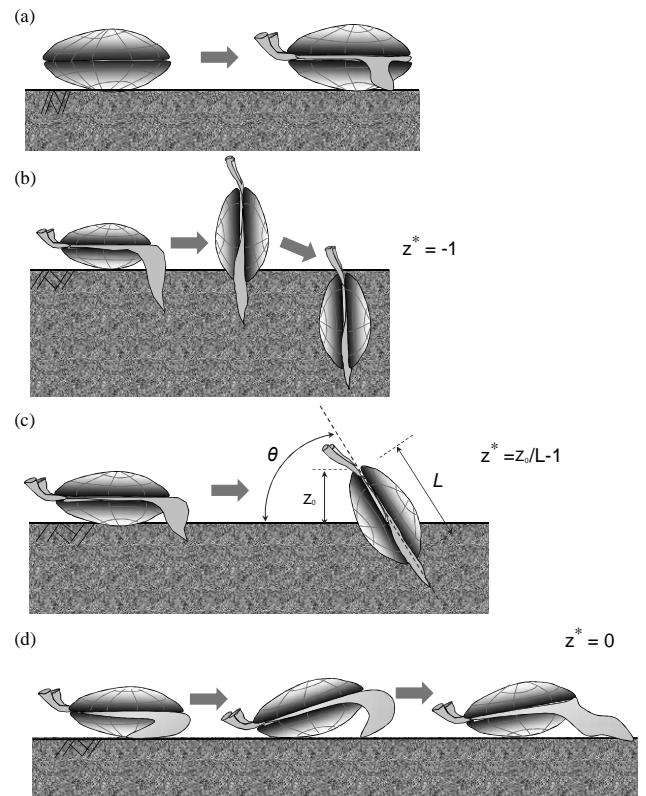


図-2 二枚貝の潜砂応答の定義

(Sassa and Watabe, 2008; Kuwae et al., 2010)。これらの既往の研究との1つの違いは、本研究では、後述するように、土砂環境動態に対する二枚貝の応答が、本報告の序論で述べたカニや鳥よりもさらに敏感であることに対応して、40mm 深さではなく、10mm 深さのベーンブレードを適用して、土砂の最表層の硬さを計測したことである。

上述の4つの干潟と砂浜、すなわち、野島干潟、白川河口干潟、由比ヶ浜および九十九里浜において、大潮干潮時に、サクシオンと土砂表層硬さの分布を計測している。また、各砂浜の潮間帯では、波の遡上にもなうサクシオンの動態を調べるために、岸沖方向の複数地点にサクシオン計を設置し、サクシオンの連続計測を合せて行った。

現地観測の結果と室内実験の計測結果を比較するために、室内実験では、野島干潟から採取した潮間帯土砂を用いて異なる3つの相対密度 40%, 60%, 80% の模型地盤を作成した (図-1 (a))。地盤上の水位と地盤内の地下水位を変化させることにより、地表レベルのサクシオンを制御した上で、室内および現地計測機器の双方を用いて、土砂硬さを計測した。図-1 (d) は、これらの計測が、精度良くなされたことを表している。同図より、土砂硬さ  $\tau^*$  は、サクシオン  $s$  ならびに相対密度  $D_r$  の増加とともに上昇し、冠

水条件に対応する負のサクシオン下では、相対密度  $D_r$  のみに依存することがわかる。

アサリおよびフジノハナガイの潜砂実験のプログラムのまとめを表-1, 2 に示している。この際、サクシオン  $s$  と相対密度  $D_r$  を規定することによって、異なる多様な土砂硬さ  $\tau^*$  を実現している。

潜砂実験では、殻長  $L=5\text{mm}, 10\text{mm}, 20\text{mm}, 30\text{mm}, 50\text{mm}$  の稚貝から成貝までのアサリと、代表殻長  $L=10\text{mm}$  のフジノハナガイを用いて、表-1, 2 に示す土砂物理環境条件に対するこれらの二枚貝の潜砂応答を調べた。各実験では、二枚貝が足を地表に接地した (図-2(a)参照) 後の6時間にわたり、各個体の潜砂深さ、潜砂角度および潜砂時間を計測した。上述の実験開始条件は、二枚貝の土砂に潜る“意志”を確認したもので、総合的な実験結果を得る上で重要であった。

全ての実験において、気温、水温、及び、塩分を、それぞれ  $20\text{-}21^\circ$ 、 $19\text{-}20^\circ$ 、 $2.7\%$  と一定に保った。又、実験の前には、生物の内在リズムを除去するために (McGaw, 2005)、新鮮な海水と潮間帯土砂を用いた室内水槽において1ヶ月以上馴致した。

各実験ケースにおいて観測した潜砂特性を、3つのシンボル a, b, c を用いて表-1, 2 にまとめている。図-2(b), (c), (d)を参照し、シンボル a は、二枚貝が鉛直に潜砂 ( $\theta = 90 \pm 10^\circ$ ) し、地表面下に完全に潜った (同図中の正規化潜砂深さ  $z^* = -1$  に達した) 状態を表している。この際、潜砂角度  $\theta$  は、潜砂の最終段階での潜砂角度を表している。シンボル b は、二枚貝が傾斜状態 ( $0 < \theta < 80^\circ$ ) で潜砂した、又は、部分的な潜砂 ( $-1 < z^* < 0$ ) に終わった状況を表している。シンボル c は、潜砂が物理的に不可能であった状態 ( $z^* = 0, \theta = 0$ ) を表している。このような状況下では、図-2(d)に示すように、二枚貝は、しばしば足を折り曲げ地表からはね返る様子がみられた。

鉛直・傾斜の潜砂形態によらず、全ての二枚貝が、潜砂を完了したケースにおける平均的な潜砂時間は、幅広く、アサリでは1.5分~105分、フジノハナガイでは18s~51sであった。

実験結果の統計解析では、二項分布を有する一般化線形モデル (GLM) を用いて、正規化潜砂深さ  $z^*$  と潜砂角度  $\theta$  に及ぼす生物種、殻長および土砂硬さの影響を調べた。また、二項分布を有する一般化加法モデル (GAM) を用いて、アサリの潜砂応答が、殻長や土砂硬さとともにどのように変化したかを合せて調べた。この際、殻長と土砂硬さを説明変数とし、表-1に示す鉛直完全潜砂と傾斜潜砂 (a と b) および潜砂不可 c を応答変数データとした。全ての統計解析には統計ソフト R2.1.1 を用いた。

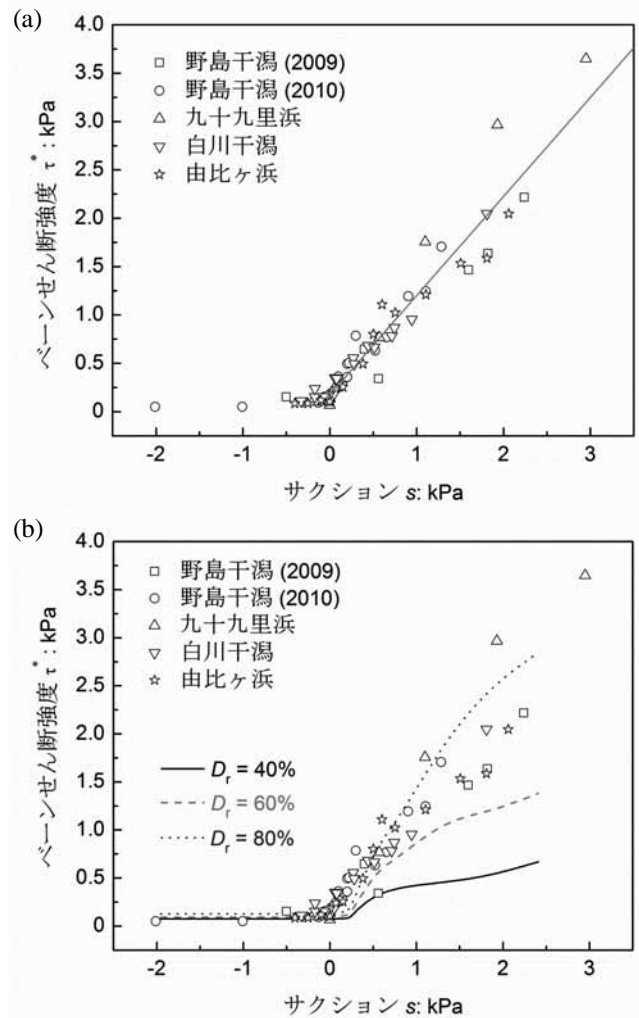


図-3 (a) 異なる4つの干潟・砂浜におけるベーンせん断強度さとサクシオンの関係、(b) 現地および室内データの比較

### 2.3 調査・実験結果

#### (1) 干潟・砂浜の生物生息場の土砂物理環境の変化

潮間帯土砂の表層硬さは、野島干潟、白川干潟、九十九里浜および由比ヶ浜において、顕著な変化特性を示した (図-3(a))。事実、これら4つ干潟・砂浜の全てにおいて、土砂硬さは、サクシオンと強い相関を有していた ( $r^2 > 0.9$ ,  $p < 0.0001$ )。詳しくみると、野島干潟では、負のサクシオン  $s < -1\text{kPa}$  に対して、わずか  $0.05\text{kPa}$  であった土砂硬さ  $\tau^*$  が、サクシオン  $2.2\text{kPa}$  の下では、 $2.2\text{kPa}$  にまで増加していた。これは、実に44倍の表層土砂の硬さの増加に対応している。他の3つの干潟・砂浜においても、同様の変化特性を示しており、サクシオンによる土砂硬さの変化は20倍~50倍に及んだ。また、図-3(a)に示すとおり、全ての計測データは、単一の関係式  $\tau^* = 1.02462s + 0.17557$  ( $r^2 =$

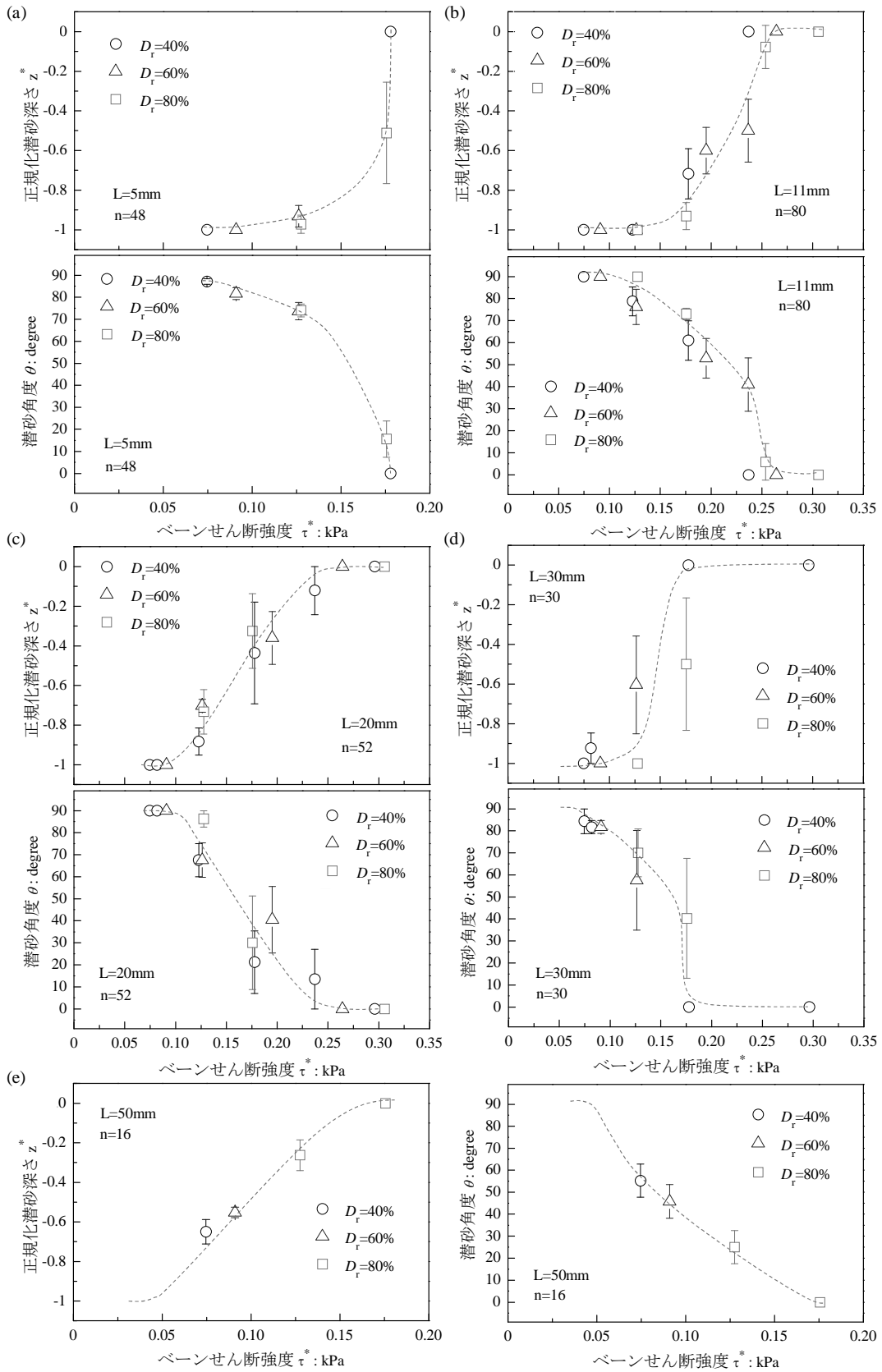


図-4 稚貝から成貝までのアサリの潜砂基準と潜砂適応の存在を示す潜砂実験結果

表-3 アサリおよびフジノハナガイの(a) 潜砂深さと(b) 潜砂角度に対する一般化線形モデル (GLM) による統計解析結果

説明変数	(a) 潜砂深さ $z^*$				(b) 潜砂角度 $\theta$			
	Estimate	SE	z value	p	Estimate	SE	z value	p
二枚貝の種類	3.68	0.69	5.303	<0.0001	-3.35	0.64	-5.254	<0.0001
殻長	0.07	0.02	4.382	<0.0001	-0.05	0.01	-3.402	0.0007
土砂硬さ	35.85	3.99	8.989	<0.0001	-32.17	3.54	-9.100	<0.0001

0.914,  $p < 0.0001$ ) によって表されることがわかる。この際、サクシオン 2kPa の発達規模は、当該土砂の空気侵入サクシオンよりも低いため (Sassa and Watabe, 2007), 上述のような土砂硬さの顕著な変化は、アサリやフジノハナガイの生息場である干潟・砂浜の“実質飽和状態”の表層土砂で生じていたことを意味している。

図-3 (b) では、上述の現地計測データを、野島干潟で採取した土砂を用いて室内で得られた異なる 3 つの相対密度に対するサクシオンと土砂硬さの関係上にプロットしている。この際、3 つの曲線は、図-1 (d) に示した範囲よりも、より高いサクシオンの範囲を含んでいることに留意したい。本図から、潮間帯の表層土砂は、高いサクシオンが発達した場所では、密になり、相対密度  $D_r$  が 80% を上回る領域が生じていることがわかる。一方、低い又は負のサクシオンが計測された場所では、土砂は緩く、相対密度  $D_r$  も 40% を下回っていることがわかる。

図-1 (d) と図-3 (b) を比較すると、室内で制御したサクシオン  $s$ , 相対密度  $D_r$  および土砂硬さ  $\tau^*$  は、いずれも現地で

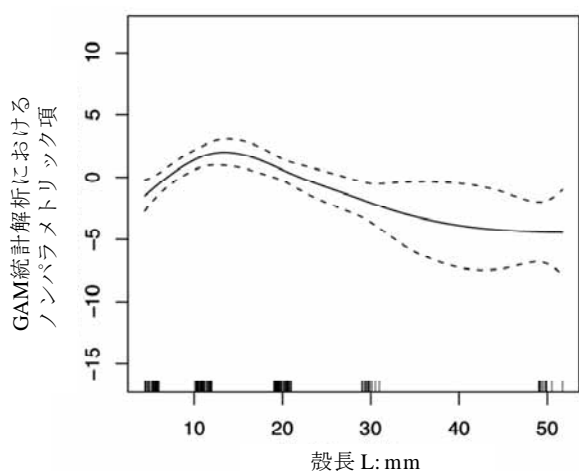


図-5 稚貝から成貝までのアサリの潜砂性能に関する一般化加法モデル (GAM) による統計解析結果

自然に生じている土砂環境動態の範囲にあることは明らかである。以下では、このような土砂環境変化に対する二枚貝応答について述べる。

(2) アサリおよびフジノハナガイの潜砂応答

潮間帯土砂の表層硬さの変化に対する稚貝から成貝までのアサリの応答観測結果を図-4 にまとめている。図-4 (a) は、殻長  $L = 5\text{mm}$  の全ての稚貝が、低い土砂硬さ  $\tau^* = 0.07\text{kPa}$  の下では、鉛直潜砂 ( $|\alpha^*| = 1, \theta = 90^\circ$ ) を完了したことを示している。しかし、土砂硬さの増加とともに、アサリは潜砂モードを鉛直から傾斜状態へと変化させて、傾斜完全潜砂、そして、傾斜部分潜砂へと移行した。実際、正規化潜砂深さ  $|z^*|$  および潜砂角度  $\theta$  は、土砂硬さ  $\tau^*$  の

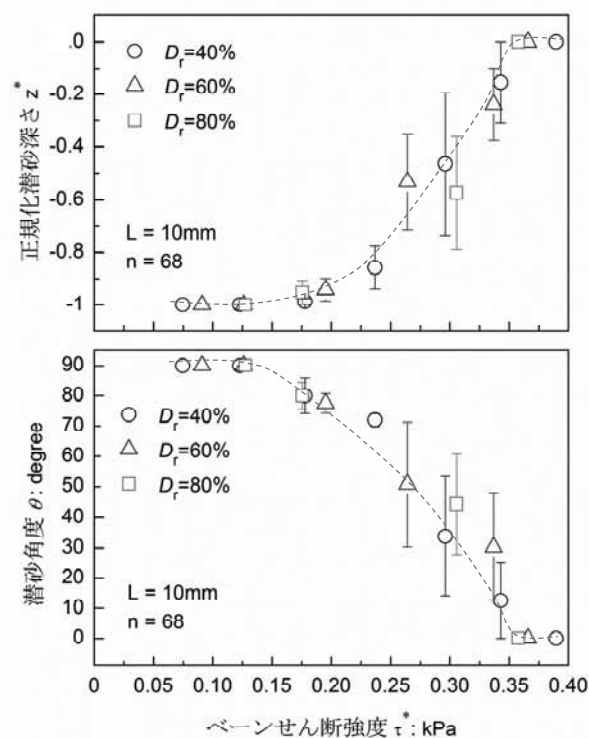


図-6 フジノハナガイの潜砂基準と潜砂適応の存在を示す潜砂実験結果

増加とともに次第に低下していった。また、この段階では、潜砂に失敗する個体も出始めた (表-1)。結局、土砂の表面硬さがある一定値  $\tau^* = 0.18\text{kPa}$  に達すると、全ての稚貝が潜砂不可 ( $\theta = 0, |z^*| = 0$ ) の状態に達したことがわかる。

上述の結果は、二枚貝の潜砂モードの変化が、ある一定の土砂硬さの範囲で生じることを示している。このことは、同時に、二枚貝が、土砂環境動態によって、鉛直潜砂を達成することが可能な土砂硬さ、ならびに、潜砂に失敗し潜砂不能になる土砂硬さの2つの潜砂基準が存在することを表している。今後の考察のために、ここでは、前者の基準値を  $\tau_v^*$ 、後者の基準値を  $\tau_f^*$  とする。このような潜砂基準と潜砂適応の存在は、図-4 (b), (c), (d), (e) に示す異なる成長段階の二枚貝応答の観測結果からも裏付けられる。ここで1つ重要なことは、上述の正規化潜砂深さ  $|z^*|$  と潜砂角度  $\theta$  の両者とも、殻長の増加とともに、顕著に低下したことであり ( $p < 0.001$ , 表-3 (a), (b))。事実、殻長  $L = 30\text{mm}, 50\text{mm}$  の成貝は、相対密度  $D_r = 40\%$  の緩詰め状態の冠水土砂に対応する最も低いレベルの土砂硬さ  $\tau^* = 0.07\text{kPa}$  の下でも、鉛直潜砂ができていないことがわかる。このことは、成貝になり殻長が増加するにつれて、二枚貝の潜砂能力が顕著に低下することを意味している (表-3 (a), (b))。

統計解析結果 (GAM) は、さらに、稚貝の段階において、アサリの潜砂能力がピークに達することを示した (図-5)。実際、殻長  $L = 10\text{mm} \sim 20\text{mm}$  の稚貝は、全ての成長段階を通じて、最も高い潜砂能力を発揮したことがわかる。

フジノハナガイは、潮間帯土砂の表層硬さの増加に対して、アサリと同様の潜砂特性を示した (図-6, 表-3 (a), (b))。すなわち、土砂環境状態による土砂硬さ  $\tau^*$  の変化の度合いに応じて、鉛直潜砂、傾斜・部分潜砂、及び、潜砂不可の3つの異なる潜砂領域が存在した。とりわけ、図-4 と図-6 を比較することによって、フジノハナガイにとって鉛直潜砂が可能な土砂硬さ  $\tau_v^*$  ならびに潜砂不可となる土砂硬さ  $\tau_f^*$  が、双方とも、全ての成長段階を通じて、アサリのそれらの値よりも高いことがわかる。

## 2.4 考察

### (1) 二枚貝の潜砂基準と潜砂適応のメカニズム

上述の結果から、干潟・砂浜に生息するアサリ・フジノハナガイの双方の二枚貝において、潮間帯土砂のベーンせん断強度により評価した土砂硬さの変化に対して、2つの新たな潜砂基準と潜砂適応が存在することが明らかとなった。ここでは、それらのメカニズムを考察するために、二枚貝の潜砂応答のエネルギー原理を考慮した概念モデル (図-7) を提示する。図-2 を参照し、二枚貝の潜砂は、

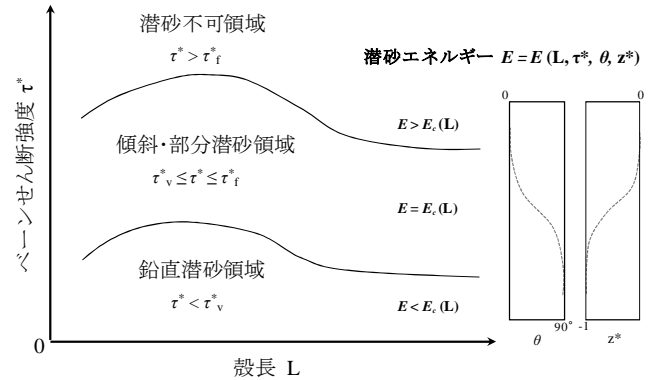


図-7 二枚貝の3つの潜砂領域を説明する概念モデル

2つの過程すなわち地表からの立ち上がりと体の地中への挿入によって構成される。これらの2つの過程に要するエネルギー  $E$  は次式のかたちで表現することができる。

$$E = \frac{L}{2} \cdot \theta \cdot w(L) \cdot g + \tau^* \cdot a \cdot L^3 \cdot \sin \theta \cdot |z^*| \leq E_c(L) \quad (4)$$

ここに  $a$  は二枚貝の形状に関する係数、 $E_c(L)$  は殻長に依存した潜砂エネルギー容量である。式(4)の第2項は、挿入に対する土の抵抗が、せん断強度、挿入深さならびに角度に依存する土質力学の概念 (Lamb and Whitman, 1979) に基づいている。本式は、所定の土砂硬さ  $\tau^*$  の下で、二枚貝の立ち上がりと挿入に要するエネルギーが、潜砂角度と潜砂深さが減少するにつれて、小さくなることを示している。鉛直潜砂が可能な領域 ( $\tau^* < \tau_v^*$ ) では、 $E < E_c(L)$  が成立し、二枚貝は自らの潜砂エネルギー容量内で自然に理想的な鉛直潜砂を完了することができる。しかし、 $\tau^*$  値が当該領域を上回る状況下では、潜砂に要するエネルギーが自らの容量に達する ( $E = E_c(L)$ ) ため、二枚貝は、式(4)に照らして、潜砂モードを傾斜モードに変化させることによって、容量オーバーのエネルギー分を補償しようとする。このことは、当該領域 ( $\tau_v^* \leq \tau \leq \tau_f^*$ ) では、 $\tau^*$  値が増加するにつれて、潜砂角度  $\theta$  及び正規化深さ  $|z^*|$  が次第に低下していくことを意味している。また、当該領域では、潜砂エネルギー容量に達しているため、潜砂モードを変化させることによって、増加した土砂硬さに適応できる個体と適応できない個体の分別が始まり、後者は潜砂に至らない。そして、最終的に、あしの挿入自体ができなくなると、潜砂不可 ( $\tau > \tau_f^*$ ) となる。

上述の考察は、鉛直潜砂領域においても、二枚貝は、より低いエネルギーコストのために傾斜潜砂モードを先ず選択し、傾斜状態で潜砂した後に、土砂内部で体を鉛直に

立て直す余地もありうることを示唆している。しかし、この事後の鉛直立て直しの過程では、二枚貝は、土を側方および上方に押し上げて、これに伴う高い受動土圧を克服する必要がある。それゆえ、二枚貝は、鉛直潜砂によって、土砂内部で安定する鉛直位置に達すると考えられる。

土質力学に基づくと、所定の潜砂深さに対して、より鋭角的な先端を有する体の挿入に必要なエネルギーは、低くなる。これは、式(4)に鑑みると、同式中のパラメータ  $a$  値が、フジノハナガイのようなより鋭い先端を有する二枚貝は、アサリのようなより丸い先端を有する二枚貝に比べて、低い値をとることに対応する。このことは、フジノハナガイが、アサリに比べてより高い土砂硬さ  $\tau^*$  の下で潜砂限界に達し、結果として、より高い潜砂基準となることを示している。

結局、以上の概念モデルによると、本実験で観測された二枚貝の潜砂応答すなわち土砂環境条件による表層土砂硬さの変化に対する、鉛直潜砂、潜砂モードの変化、ならびに、潜砂限界の発現を統合的に説明することができる。

#### (2) 二枚貝の潜砂基準および潜砂適応の役割と重要性

干潟・砂浜の表層土砂は、サクシオン動態の効果すなわちサクシオンの発達とサクシオン動態による土砂の高密度化の双方の影響によって、土砂硬さが顕著に変化する (Sassa and Watabe, 2007, 図-3)。室内潜砂実験において再現した潮間帯土砂のサクシオン、相対密度ならびに硬さの土砂物理環境条件は、全て、現実的な値である。特筆すべきは、アサリとフジノハナガイという干潟・砂浜の異なる二枚貝の両者とも、このような現地で発現している土砂環境条件の変化に対して非常に敏感な応答を示し、鉛直潜砂、傾斜・部分潜砂、潜砂不可と遷移したことである。潜砂不可の状況では、二枚貝は地表に露出した状態になるため、波や流れによって簡単に流れ去る (Ratcliffe et al., 1981) とともに、直射日光 (Johnson, 1965) や外敵の餌食 (Tallqvist, 2001) に直にさらされることになる。これらは全て生き残

る機会を大きく減ずるものである。

潜砂モードの変化は、二枚貝がより厳しい土砂環境条件に適応するための顕著な能力を表しているといえる。実際、上述の現地調査・実験・概念モデルの連携によって、二枚貝が表層土砂の硬さを評価し、それが通常の鉛直潜砂が可能な硬さを上回る場合には、これに対応するために、“かしく” 潜砂モードを調整していることが明らかとなった。傾斜潜砂によって地表下に体を埋めた状況は、上述のような厳しい土砂環境条件下で通常の鉛直潜砂にこだわり地表に露出することになった場合に比べて、外敵の餌食になるリスクや流出のリスクが小さくなると考えられる。

しかし、水管長がある一定長さに限られる二枚貝にとって、傾斜潜砂は、鉛直潜砂に比べ、潜砂深さがより浅くなるため、上述のリスクが高まることになる。さらに、土砂硬さが増加すると、傾斜潜砂は、部分潜砂や潜砂不可を伴うことになる。それゆえ、自然に鉛直に潜砂できる土砂環境条件が、潜砂ひいては生存に適した条件であるといえる。

二枚貝は、酸素や餌を地表の直上水から採取するため、その“食環境”は水理環境条件に依存しているといつてよい。以下では、住環境を担う土砂環境条件に対する二枚貝の潜砂応答が、稚貝から成貝にかけてアサリの空間分布において重要な意味を有していることを示す。すなわち、本研究では、アサリの潜砂能力が、稚貝から成貝にかけて著しく低下し、成貝のアサリにとって、鉛直潜砂に適した条件は、相対密度 40%未満の緩詰め状態の土砂であるのに対して、稚貝のアサリは相対密度 80%の最も密な冠水土砂においても鉛直完全潜砂が可能であることを明らかにした。このことは、成貝のアサリの岸沖分布が、サクシオンが発達しないために、相対密度 40%以下と緩詰め状態に留まる潮間帯下部に限られること (Tamaki et al., 2008)、一方、稚貝のアサリは、相対密度 80%の密詰め状態の土砂を含む潮間帯の全領域に広く及ぶこと (Tamaki et al., 2008) を、初めて定量的に説明するものである。



写真-1 野島干潟のパートラフ地形と潮干狩りの風

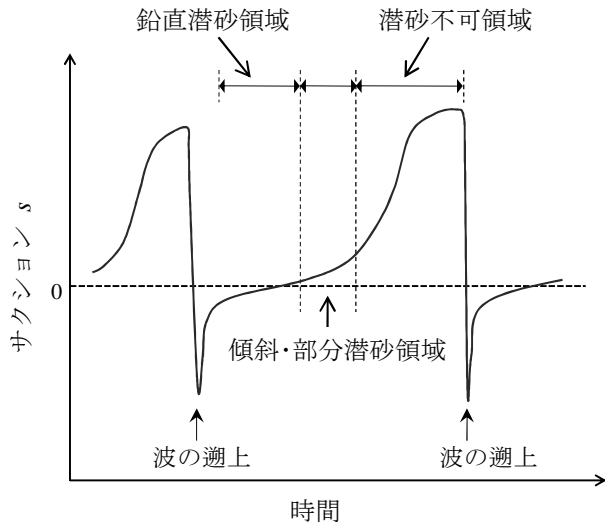


図-8 波の遡上に伴うサクション動態とフジノハナガイの3つの潜砂領域の関係を示す模式図

同様に、写真1に示すような干潟のパートラフ地形においては、干潮時に露出したバーでサクションが発達しサクション動態によって土砂が高密度化する (Sassa and Watabe, 2007) ことにより、全てのサイズ、特に成貝のアサリにとって有効に潜砂することができなくなる (表-1, 図-4)。このことは、サクション不在のために緩い状態を保ちつつも、動的に安定したバー (Sassa and Watabe, 2009) の一部として近隣のトラフよりもより安定し潮汐サイクルを通じて潜砂に適した土砂環境を実現している“水際”の土砂に成貝ひいては潮干狩りが集中する状況 (写真-1) をよく説明している。本知見は、アサリ再生のための有効な土砂環境設計や管理につながるものである。

また、二枚貝が、水理外力、生物攪乱又は人為的攪乱によって、ひとたび地表に出てしまうと、土砂に再び落ち着くことができるか否かは、その際の土砂環境動態と上述のような成長段階に伴って変化する潜砂能力間のバランスに依存する。そのような関係は、所定の干潟における稚貝から成貝までのアサリの生活史にも長期的な影響をもたらしていると考えられる。

アサリの保全・資源管理の観点からは、幼生期のアサリの加入は、潜砂能力が稚貝段階までは低い (図-5) ことから、土砂の耕耘によって高めうる。しかし、潮間帯の土砂硬さの変化は実質的にサクションの働きによってもたらされるため、サクションと密接に関わる微地形や地下水位の維持管理が有効に機能するといえる。

砂浜のフジノハナガイの潜砂基準と潜砂適応は、干潟の全成長段階のアサリよりも、より厳しい土砂環境条件下で発現していた。また、フジノハナガイは、全サイズのアサ

リよりも早く潜砂した。これらのことは、砂浜の潮間帯では、砂質干潟に比べて、より早くかつより厳しく生じる土砂環境動態に対するフジノハナガイの環境適応を表しているといえる。実際、砂浜潮間帯のサクション動態は、潮汐とともに波の遡上によってもたらされている (図-8)。フジノハナガイのような砂浜の Donax 種に属する二枚貝は、素早い潜砂行動でよく知られており、所定の土砂粒度の下で、その行動は波の遡上動態によって支配されていると考えられてきた (McLachlan, 1995; Nel et al., 2001; Huz et al., 2002; Defeo and McLachlan, 2005)。それはつまり、ある波の遡上に乗って移動してきた二枚貝は、次の波の遡上による流出から逃れるために、素早く潜る必要があるというものである。しかし、本研究の現地調査・計測と実験結果によると、通常 20s~10 分の範囲の時間間隔で生じる波の遡上サイクルの間に、地下水位は変動し (Longuet-Higgins, 1983; Cartwright et al., 2006)、それに伴うサクション動態によって潜砂不可の時間領域が形成される (図-8)。実際、波の遡上の繰り返し過程の中で、地表レベルのサクションは 2kPa まで上昇し、砂浜潮間帯の土砂硬さは 20-50 倍増加した (図-3 (a))。一方、フジノハナガイは、相対密度 80% に対しては、地下水位が地表面下僅か 7mm のサクション 0.07kPa に対して、相対密度 60% に対しては、地下水位が地表面下僅か 17mm のサクション 0.17kPa に対して、潜砂が不可能となったことを明らかにしている (表-2)。さらに、これら異なる2つのセットの土砂環境条件は、同じ潜砂基準値  $\tau^*_f = 0.36\text{kPa}$  をもたらした (図-6)。以上の結果は、砂浜の二枚貝が、次の波の遡上から逃れるためではなく、それに先立って急速に増加する土砂硬さによって潜砂不能になる状況を避けるために素早く潜る必要があることを実証している。このことは、砂浜の急速に変化する土砂環境動態によって支配される二枚貝の行動適応の新たなメカニズムを明示するものである。さらに、砂浜の二枚貝形状に関して前節に記した考察は、フジノハナガイのような Donax 種の流線型の二枚貝形状が、砂浜で生じているようなより厳しい土砂環境動態に対する環境適応の結果であることを示唆しているといえる。

## 2.5 まとめ

本章では、干潟・砂浜に生息する典型的な異なる2つの二枚貝種すなわちアサリとフジノハナガイにおいて、土砂環境動態に対する2つの新たな潜砂基準と潜砂適応が存在することを見出した。これらの新たな知見とともに、その発現機構を解明し、干潟・砂浜における稚貝から成貝にかけて二枚貝の空間分布と行動・形状適応に果たす役割と重要性について明らかにした。



### 3. 巣穴底生生物の土砂環境選択行動と分布形成機構

#### 3.1 はじめに

生物がいかにして生息場所を選択し個体群（パッチ）を形成するかは、生態保全・管理上の基本的課題である（巖佐ら, 2003; 大串ら, 2008). 一般的には、主に生物の食活動の源である餌の分布や捕食生物の存在によって決まるとされるが、最適採餌モデルによる予測は実際の底生生物の分布と乖離があることが知られている（巖佐ら, 2003).

また、河口・沿岸域に生息する生物相に対して影響を及ぼす環境とは、主に波・流れなどの水理・水質環境であり、その厳しさに対応して生物が応答していると考えられてきたが（e.g. McLachlan et al., 1993), 筆者らは、本報告の序論及び2章で述べたように、生物住環境を担う地盤表層の土砂環境が多様な生物生態に重要な寄与を成していることを明らかにしてきている。

本章では、以上を背景として、従来見過ごされてきた住活動場に関する筆者らの近年の知見に基づき、最適住活動モデルと連携した各種の生態地盤実験と現地調査を実施し、巣穴底生生物の土砂環境選択行動とパッチ形成過程を詳しく検証することを目的としている。

#### 3.2 巣穴底生生物の土砂環境選択実験と現地調査

Sassa and Watabe (2008)は、砂質干潟の典型的な巣穴底生生物であるコマツキガニを対象として、巣穴住活動の臨界・最適・限界サクシオン条件が存在することを見出すとともに、その発現メカニズムを統合的に説明する最適住活動モデル（図-9）を提示した。ここに、同図のサクシオンは地表レベルのそれを表す。本研究で実施した各種の実験デザイン・分析において、当該モデルは重要な役割を担っており、以下にその要点について説明する。

a) 巣穴底生生物は、地下水位を境にして地下水面上と地下水面下の2つの特徴的な巣穴活動領域を有する。b) 地下水面上の土砂領域における巣穴活動に対して、サクシオンは2つの対照的な効果を有する。すなわち、サクシオンの存在が生み出す実効粘着力は、巣穴掘削が物理的に可能となる土砂深さを規定する。これとは対照的に、サクシオンの発達によってもたらされる土砂強度の増加は巣穴掘削をより困難にする。これらのサクシオン効果の間のトレードオフの関係が、地下水面上で最も高い巣穴発達度が得られる最適サクシオン状態  $OP^A$  と巣穴発達が困難な限界サクシオン状態  $CR$  をもたらす（図-9 参照）。c) 地下水面下の土砂領域における巣穴活動に対しては、当該生物はそれ自体と封入した空気を含む閉じた空洞を作り出してこれを活用している。すなわち、巣穴が地下水面に達した

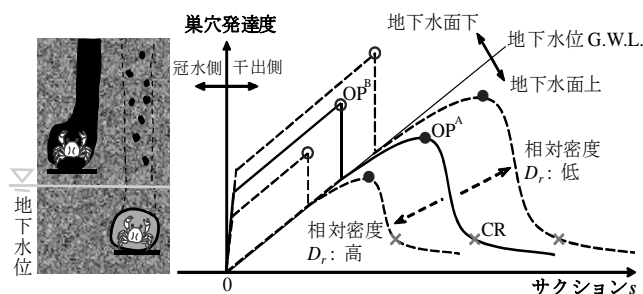


図-9 巣穴底生生物の最適住活動モデル：巣穴発達、サクシオンと関連する土砂環境場のリンクを説明する概念モデル

後は、サクシオン不在による相対密度のみに依存した土砂強度に応じた一定の巣穴深さが付加される。その結果として、地下水面下において最も深い巣穴深度が得られる最適サクシオン状態  $OP^B$  が表れる（図-9 参照）。d) 巣穴住活動の性能は、これら3つの土砂物理状態  $CR$ ,  $OP^A$ ,  $OP^B$  によって特徴づけられる。この際、各住活動の性能は、サクシオンと相対密度に依存した上記状態に固有の土砂強度の下で発現する。

上述の概念モデルによると、現地および実験において観測した生物応答特性、すなわち巣穴住活動を支配する臨界サクシオン条件、地下水位上下の異なる2つの最適サクシオン条件および限界サクシオン条件と関連する土砂物理環境条件の存在を統合的に説明することができる。

本研究では、このような巣穴住活動の最適・限界場が土砂環境の選択行動とパッチ形成に果たす役割を明らかにするために、海水を用いて土砂環境の空間分布をコンパクトに制御しうる干潟生態土砂環境再現水槽（図-10）を新たに開発し適用した。本水槽は、両側に地下水位変動を独立に負荷することができる遊水室を設け、干潟地盤内部の土砂環境勾配を自在に制御・負荷して底生生物応答を詳しく検証することを可能にした実験装置である。

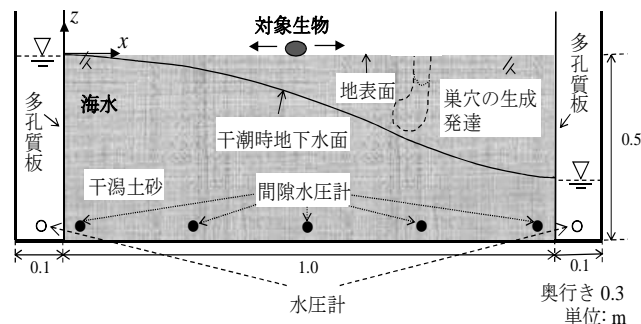


図-10 干潟生態土砂環境再現水槽を用いた実験状況

本研究では、上述の水槽と現地干潟土砂（野島干潟）を用いて代表相対密度  $D_r = 60\%$  の地盤を作成し、所定の地下水位・サクシオン・ベーンセン断強度の分布を実現した上で、最適・限界サクシオンに対応する地点にコメツキガニを段階的に投入し、その後の土砂環境選択行動とパッチ形成過程を詳しく調べた。この際、生物の初期投入場所として、上述の地下水位上下の異なる2つの最適サクシオン場 ( $OP^A$  と  $OP^B$ ) と限界サクシオン場 (CR) を設定し、計3シリーズの土砂環境選択実験を行った。ここで、以下の考察に資するために、図-9に鑑み、 $OP^B$  の巣穴発達度が  $OP^A$  のそれよりも高いことに触れておく。

また、実験において、大気・水環境は、気温  $20^\circ\text{C}$ 、水温  $18^\circ\text{C}$ 、塩分 2.7% と全て一定に保持した。

上記の土砂環境選択実験を実施した後に、生物の土砂環境探知能力すなわち“生物センサ”の存在を詳しく検証するための実験も合わせて実施した。

さらに、本研究では、潮汐作用下のサクシオン動態にともなう土砂環境変化の影響を考慮した最適住活動モデルを構築し、上述の実験結果を踏まえた現地個体群の形成予測を行った。そして、コンパクトな砂質干潟でコメツキガニの顕著なパッチ形成がみられる千葉県夷隅川河口干潟 (図-11) において、現地土砂環境/生物分布の一体調査を実施し、現地土砂環境-パッチ形成のリンクに関する調査結果と対応する予測結果を突き合せた。

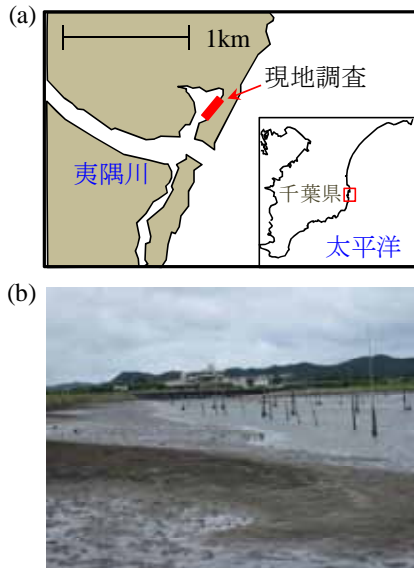


図-11 現地調査を行った千葉県夷隅川河口干潟

### 3.3 実験・調査結果と考察

土砂環境選択実験では、まず、最も高い巣穴発達度が得られる最適サクシオン場に放たれた生物は、速やかに巣穴

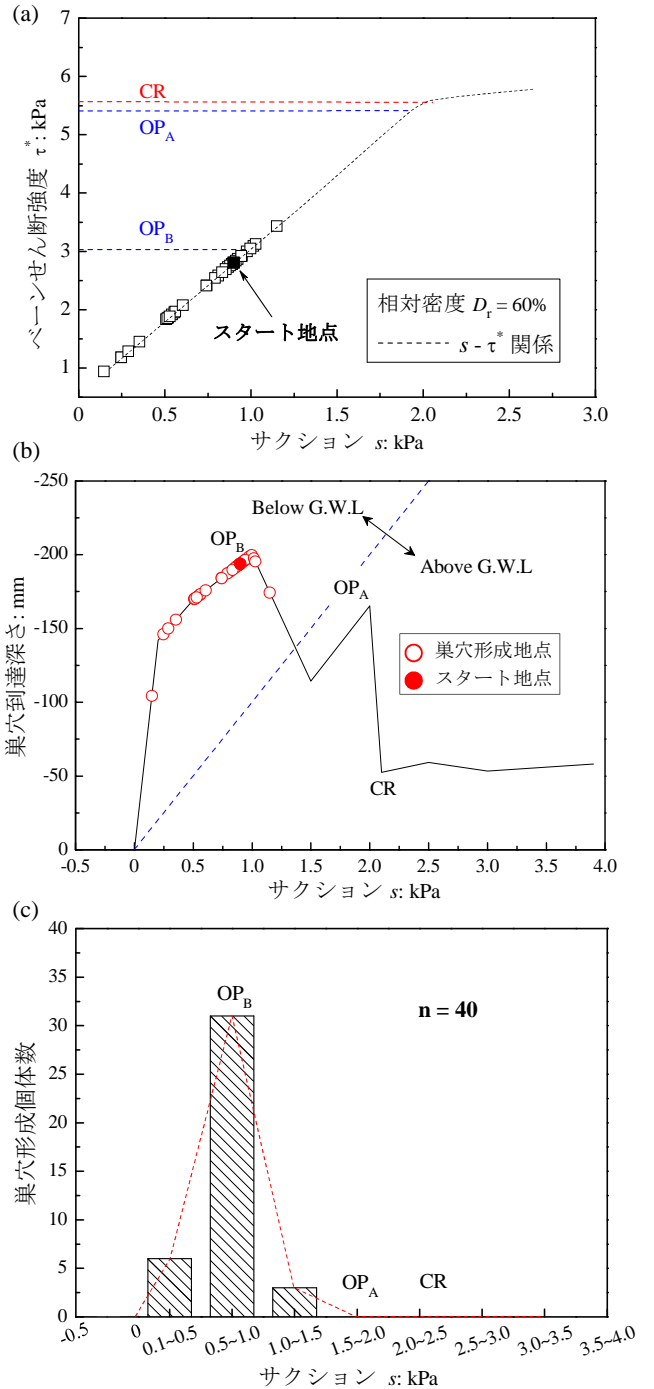


図-12 最適場  $OP^B$  に放たれた巣穴底生生物の土砂環境選択・パッチ形成実験結果のまとめ

活動に入ったのに対し、巣穴が発達できない限界サクシオン場に放たれた生物は「移動する」ことが明らかとなった。

以下では、実施した3シリーズの実験結果について順に記述・考察する。

図-12は、上述の最適場  $OP^B$  に放たれた巣穴底生生物の土砂環境選択・パッチ形成実験の結果を示している。この際、同図(b)の巣穴深さは後述する図-16のデータ ( $D_r =$

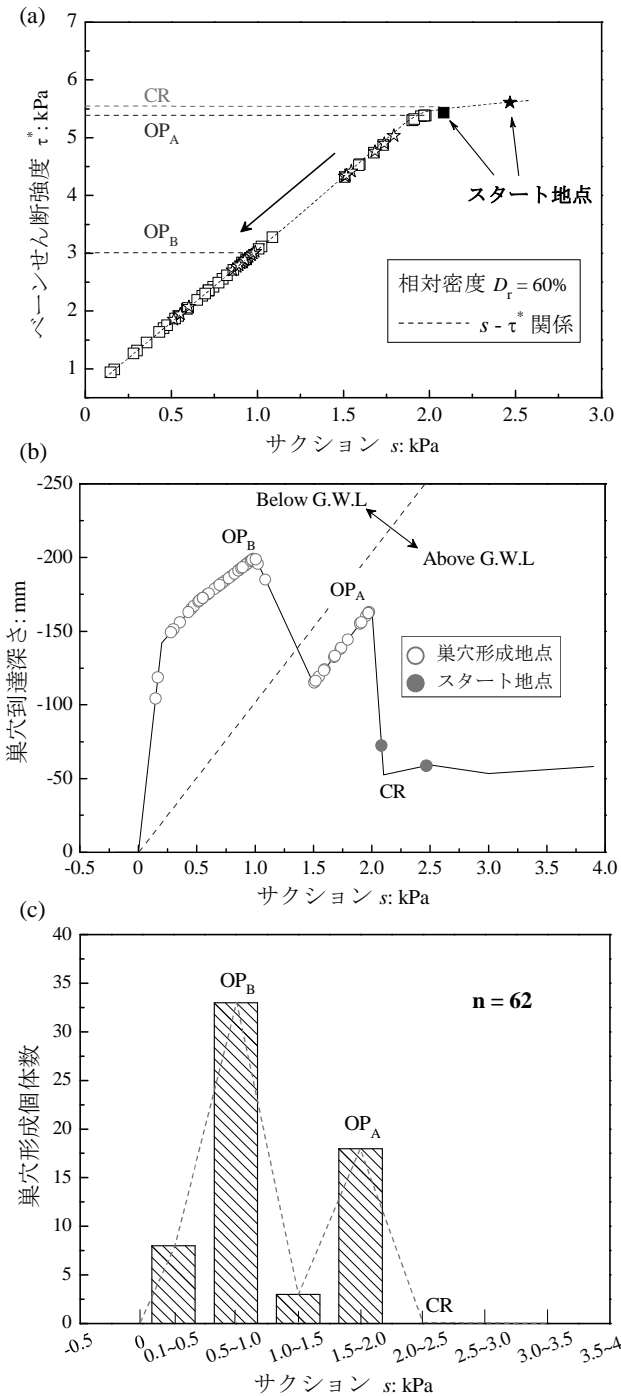


図-13 限界場 CR に放たれた巢穴底生生物の土砂環境選択・パッチ形成実験結果のまとめ

60%, 平均値±標準誤差)の平均値を表している。本図より、最適場 ( $OP^B$ ) の生物は、他の適合場 ( $OP^A$ ) や限界場 (CR) に移動することなく、ほぼ全ての個体が当該最適場の近傍において住活動を行っていることがわかる。一方、限界場 CR に放たれた巢穴生物は全く異なる行動を示した。すなわち、図-13において、限界場 (CR) の生物は、当該場で"試し掘り"をすることなく地下水位上または下

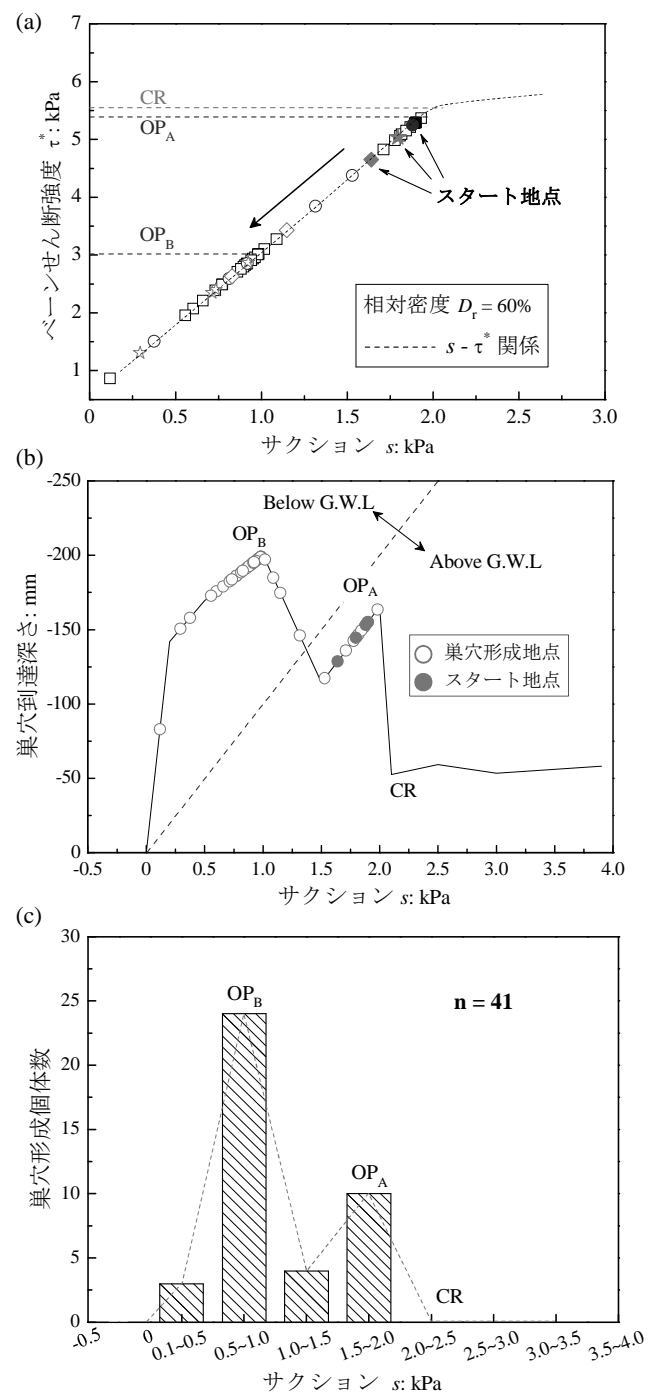


図-14 適合場  $OP^A$  に放たれた巢穴底生生物の土砂環境選択・パッチ形成実験結果のまとめ

で巢穴が十分発達可能な適合サクシオン場 ( $OP^A$  と  $OP^B$ ) へと移動し住活動を行った。そして、地下水位上の適合場 ( $OP^A$ ) に放たれた生物 (図-14) は、当該適合場または地下水位下でより高い巢穴発達度が得られる最適場 ( $OP^B$ ) へと移動し住活動を行った。上述の結果、3シリーズの実験を通じて、巢穴形成不能な臨界サクシオン場 ( $s = 0$ ) や限界場 (CR) では住活動は全く行われず、地下水位上下でピ

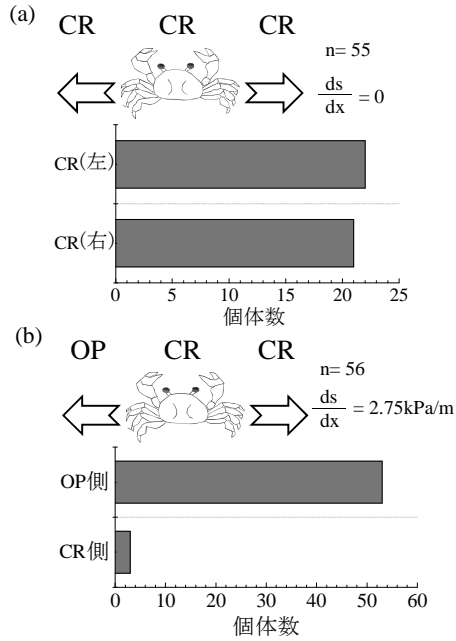


図-15 生物センサ検証実験結果のまとめ：(a) サクシオン勾配無し，(b) サクシオン勾配有り

一ク巣穴深さが得られる適合場 (OP<sup>A</sup> と OP<sup>B</sup>) に集中するかたちでパッチ分布が形成された。

以上に述べた観測事実は、生物が自らの巣穴住活動に適した土砂環境を探知する能力があることを強く示している。このことを検証した実験結果を図-15に示す。限界場で地表サクシオンの空間勾配がゼロの地点に放たれた生物は、同図(a)に示すように、全くランダムな方向に移動したのに対し、同様の限界場で地表サクシオンの勾配を与えた地点では、同図(b)に示すように、95%の生物個体が適合場に向けて移動した。これらの結果は、当該生物が土砂環境 (サクシオン) の空間勾配を“感知”し、自らの住活動に適した場に向かって移動することを明示している。地表レベルのサクシオン勾配は、2.75kPa/m であり、これは当該生物スケール (横幅約20mm) に換算して約5mmの水頭差に対応する。同値は、“生物センサ”の土砂環境探知精度を表しており、きわめて興味深い。

本研究では、潮汐作用下の地下水位変動ともなうサクシオン動態による土砂環境変化を考慮した最適住活動モデルを構築している。当モデルとその土台となった実験結果(平均値±標準誤差, Sassa and Watabe, 2008) を図-16に示している。その要点は次のようである。サクシオン動態により地下水位上の土砂が高密度化 ( $D_r = 60 \rightarrow 80\%$ ) すると、当該領域の適合サクシオン値が低下し、最も高い巣穴発達度が得られる最適サクシオン値に漸近・一致する ( $s_{OP^B_{60}} \cong s_{OP^A_{80}}$ )。その結果、巣穴住活動に最適なサクシ

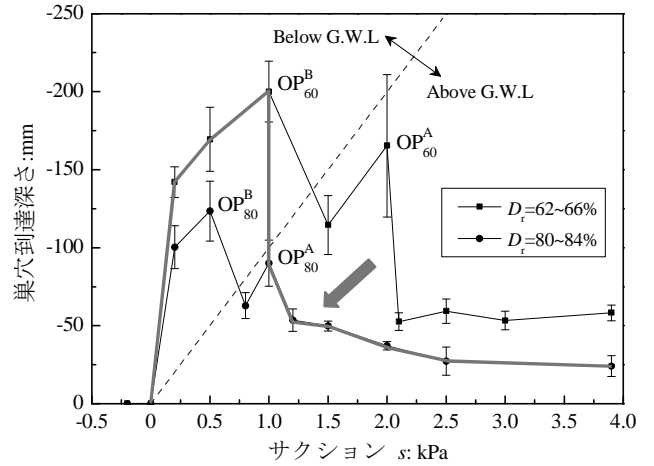


図-16 サクシオン動態による土砂の高密度化を考慮した最適住活動モデル

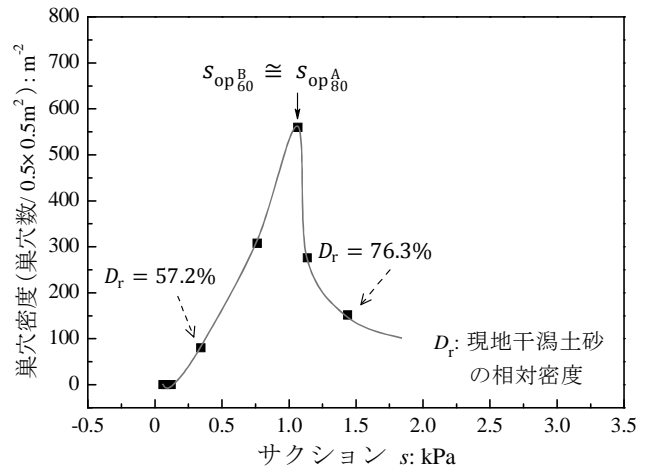


図-17 夷隅川河口干潟における巣穴底生生物のパッチ形成／土砂環境場のリンクに関する現地調査結果

ン条件は、地下水位の上下を問わず単一の場合 ( $s \cong 1\text{kPa}$ ) に集中し、これ以上のサクシオンの発達により巣穴住活動は困難となる。このことは、上述の土砂環境選択実験の結果を踏まえると、当該サクシオン場で顕著なパッチが形成されるとともに、それを上回るサクシオン場の下で個体群密度が大きく低下することを示唆している。このようなパッチ形成の予測結果を以下で検証する。図-17は、千葉県夷隅川河口干潟において実施した現地土砂環境／生物分布の一体調査結果を示している。まず、サクシオンが低い地点から高い地点にかけて相対密度が上昇し、その上昇幅は約20%と上述のモデルの前提と整合していることがわかる。そして、巣穴住活動ができない臨界サクシオン条件 ( $s = 0$ ) では巣穴密度がゼロであるのに対し、サクシオンが発生する地点においては、サクシオン値の上昇とともに巣穴密度

は顕著に増加し、上述の最適サクシオン場 ( $s_{OP}^B_{60} \approx s_{OP}^A_{80}$ ) に対応する  $s \approx 1\text{kPa}$  において単位平方メートル辺り 600 個体を超える卓越したパッチが形成されていることがわかる。そして、それ以上のサクシオンの上昇とともに巣穴密度が急激に低下していることがわかる。これらの現地土砂環境-パッチ形成のリンクに関する調査結果は、上述の最適住活動モデルによる予測結果と非常によく整合しているといえる。

### 3.4 まとめ

本章では、巣穴底生生物の住活動の最適・限界場が土砂環境の選択行動とパッチ形成に果たす役割を明らかにするために、新たに開発した干潟生態土砂環境再現水槽を用いたコマツキガニの土砂環境選択・パッチ形成実験ならびに土砂環境探知能力の検証実験、ならびに、現地土砂環境動態を考慮した最適住活動モデルの構築と土砂環境／パッチ形成の実態調査を一体的に行った。

その結果、当該生物は巣穴発達のための最適・限界サクシオン場を探知する“生物センサ”を有し、地表サクシオンの空間勾配に基づいて、住活動に適した場を自ら選択して巣穴活動を行うことを世界で初めて明らかにした。

そして、生物個体群 (パッチ) の分布が、実験・現地調査結果の双方で、提案する最適住活動モデルによる予測と見事に整合するかたちで現れることを示した。

## 4. 砂浜海岸の生物住環境と岸沖生物分布に果たすサクシオンの役割

### 4.1 はじめに

砂浜潮間帯に生息する潜砂性の小型甲殻類は、ホシガレイやメナダなどの水産有用種をはじめ多種多様な魚類の重要な餌資源となっている (Takahashi et al., 1999; 首藤, 2002; 梶原・高田, 2008)。また、同時にシギ・チドリなどの渡り鳥の餌にもなっており (Brown and McLachlan, 1990)、海岸の掃除屋としても、美しい砂浜の保全に多大な貢献を成していることが知られている。しかし、これらの餌資源生物の密度と水温・塩分・粒度・勾配等の既往の各環境要因の間には有意な相関が認められず (James and Fairweather, 1996)、その生息分布を規定する要因については、様々な時空間スケールのものが介在するとして未だよくわかっていないのが現状である (Defeo and McLachlan, 2005)。

一方、梶原・高田 (2008) は、砂浜の小型甲殻類を対象とした室内実験により、地盤内部の物理環境がその潜砂行動の可否に多大な影響を及ぼすことを明らかにしている。

本章では、以上を背景として、本報告の序論および 2、3 章で記した生態地盤学手法を新潟県の 3 つの海浜に展開し、上述の問いに答えることを目的としている。そして、干潟と砂浜の保水動態機構に関する近年の知見 (佐々ら, 2007) も踏まえて、砂浜潮間帯の底生生物の住環境について一般化するとともに、従来研究が欠けていた生物住活動の適合・限界場の観点から現地調査及び室内試験結果の分析と考察を行った。

### 4.2 砂浜海岸における土砂物理環境／底生生物分布の一体調査と室内試験

現地調査を行った海浜は、日本海沿岸 (新潟市) に位置し、前浜幅、粒度、勾配、塩分等の特性が互いに異なる四ツ郷屋浜、太郎代および太夫浜である (図-18)。同図より、前

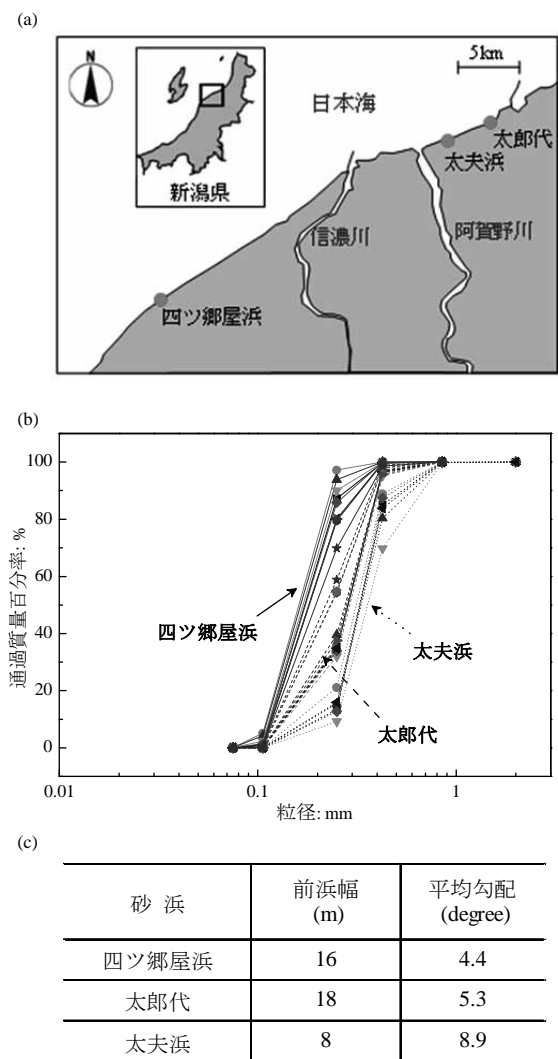


図-18 現地調査を行った 3 海浜の場所と粒度・勾配・前浜特性

浜幅が相対的に広く緩勾配で粒径が細かい四ツ郷屋浜と前浜幅が相対的に狭く急勾配で粒径の粗い太夫浜とは各因子が倍のオーダーで異なることがわかる。また、太夫浜は阿賀野川河口に位置しており、塩分も他の2海浜の約半分であることが知られている。本研究ではこれらの3海浜の前浜において、平成21年10月20日～22日の大潮最干時（潮位差約0.3m）に土砂物理環境と底生生物分布の一体調査を実施した。具体的には、サクシオン  $s$ 、地下水位、底質硬さを表すベーンセン断強度  $\tau^*$  の岸沖分布を計測し、各地点において表層土砂（深さ50mm）のサンプリングを行った。

一般に、干潟に発達するサクシオンは、以下に述べる空気侵入サクシオン値より低いいため、土中水分が常に保持される一方、砂浜ではサクシオンが空気侵入サクシオン値より高い不飽和帯が形成されることが特徴である（佐々ら、2007）。空気侵入サクシオン  $s_{aev}$  の推定式は、次式で表すことができる（佐々・渡部、2006b; 佐々ら、2007）。

$$s_{aev} = \frac{\psi}{e \cdot D_{10}} \gamma_w \quad (5)$$

ここに、 $D_{10}$  は土砂の有効粒径、 $e$  は間隙比、 $\gamma_w$  は海水の単位体積重量、 $\psi = 20\text{mm}^2$  は係数である。上式(5)は、これまでに自然砂質干潟、人工干潟および人工海浜において適用性を確認しており、本研究では上述の3つの自然海浜において詳しく検証した。

そして、同一地点で採取した土砂の湿潤重量のばらつきが  $\pm 5\%$  以内に収まることを確認した“不攪乱”状態のサンプルに対して各種の室内試験を実施し、現地土砂の粒度分布、含水比  $w$ 、土粒子比重  $G_s$ 、間隙比  $e$ 、相対密度  $D_r$  と飽和度  $S_r = G_s \cdot w / e$  を得た。

上述の各地点において、底生生物分析用の4つのコアサンプル（直径100mm、深さ100mm）を採取し、3海浜を通じた優占3種の小型甲殻類であるナミノリソコエビ、ヒメスナホリムシ、およびヒゲナガハマトビムシの生息密度分布（平均値  $\pm$  標準誤差 SE）と対応する土砂物理環境の突合せを行った。この際、採取した生物の体長範囲は、上記の生物種の順に、5–8mm、6–12mm、8–18mm であった。

### 4.3 調査・試験分析結果と考察

上述の3海浜における実測サクシオンと式(5)に基づく空気侵入サクシオン値の関係を図-19に示す。同図から、四ツ郷屋浜、太郎代、太夫浜の順に細砂から中砂へと粒径が粗くなるにつれて  $s_{aev}$  値が低くなり、全ての砂浜を通じて、実測サクシオン  $s$  が  $s_{aev}$  値以下である飽和域と  $s_{aev}$  値

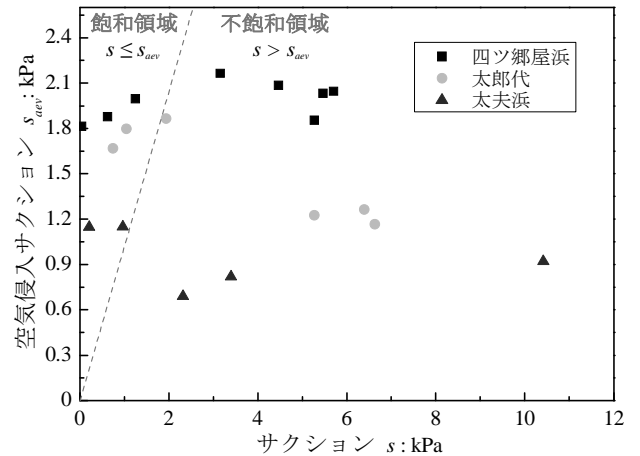


図-19 3海浜のサクシオンと空気侵入サクシオンの関係

を上回る不飽和域の両者が形成されていることがわかる。

以下では、このような砂浜潮間帯における生物住環境の多様性とその発現メカニズムについて述べた後に、小型甲殻類の生息分布を支配する要因について記述・考察する。

#### (1) 砂浜生物住環境の多様性とその発現メカニズム

##### (a) 四ツ郷屋浜

前浜勾配が緩やかで粒径が細かく3海浜の中ではDissipative型に分類される四ツ郷屋浜のサクシオンと飽和度・相対密度・ベーンセン断強度の関係を図-20に示す。まず、同図(a)から、式(5)に基づく空気進入サクシオン値  $s_{aev}$  以下の実質飽和域において実測飽和度  $S_r \approx 100\%$  となっており互いに整合していることがわかる。そして、同  $s_{aev}$  値を超えるサクシオンの上昇とともに飽和度は次第に低下し、サクシオン6kPaにおいて  $S_r \approx 10\%$  の実質乾燥状態に至っている。同図(b),(c)は、このような土中水分の保持状態と土砂の間隙・硬軟状態が相互に密接に関わっていることを示している。すなわち、実質飽和状態では、サクシオンの上昇とともに間隙比は減少し、対応する相対密度も  $D_r > 90\%$  と極めて密に締った状態が現れるとともに、ベーンセン断強度  $\tau^*$  もサクシオンゼロの際の実に15倍に達していた。一方、不飽和域ではサクシオンの更なる上昇とともに相対密度  $D_r$  ならびにベーンセン断強度  $\tau^*$  が顕著に低下していることがわかる。

##### (b) 太郎代

前浜勾配や粒径が3海浜の中間に位置する太郎代の調査・分析結果を図-21に示す。まず、空気進入サクシオン値の予測範囲と実測飽和域が良好に一致していることがわかる。また、上述の四ツ郷屋浜と比べて、 $s_{aev}$  値が低下したことにより実質飽和域が狭まったものの、 $s_{aev}$  値を基

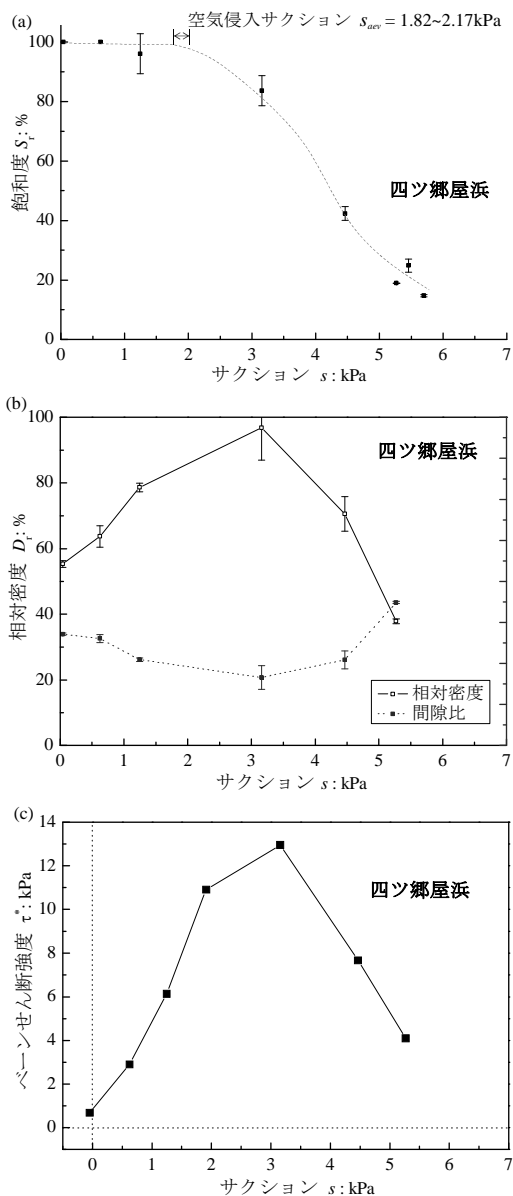


図-20 四ツ郷屋浜の生物住環境特性：(a) 飽和度, (b) 相対密度, (c) ベーンせん断強度とサクシジョンの関係 (工：±SE)

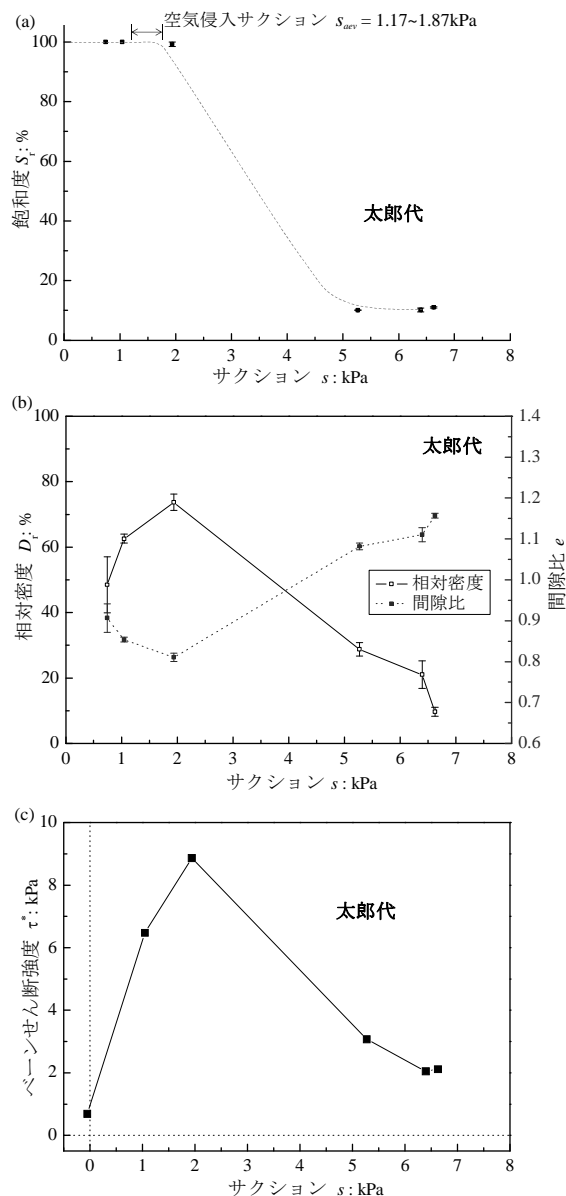


図-21 太郎代の生物住環境特性：(a) 飽和度, (b) 相対密度, (c) ベーンせん断強度とサクシジョンの関係 (工：±SE)

準とした飽和度・間隙・硬軟の顕著な変化特性が共通して発現していることがみてとれる。

(c) 太夫浜

前浜勾配が急で粒径が粗く 3 海浜の中では Reflective 型に分類される太夫浜の調査・分析結果を図-22 に示す。  $s_{aev}$  値は著しく低下した一方、同予測値の妥当性が裏付けられる。これにより大きく狭まった実質飽和域 ( $s \leq s_{aev}$ ) においても、サクシジョン  $s$  の発達とともに、相対密度  $D_r$  およびベーンせん断強度  $\tau^*$  は顕著に増加し、不飽和域 ( $s > s_{aev}$ ) では  $D_r$  と  $\tau^*$  の両者とも実質乾燥状態に至るまで低下し、

結果としてサクシジョンによる緩密と硬軟の変化が 15~20 倍のスケールに及んでいることがわかる。

(d) 砂浜生物住環境の一般化

本節では、多様な砂浜生物住環境の特性について一般化する。このために、上述の 3 海浜において共通して発現した土砂物理環境の変化特性を図-23 に示している。

Sassa and Watabe (2007) は、実質飽和状態 ( $s \leq s_{aev}$ ) で干出・冠水を繰り返す干潟土砂においては、サクシジョン動態の厳しさに応じて顕著な繰り返弾塑性収縮が生じて間隙・硬軟構造に忠実に反映されることを明らかにしている。

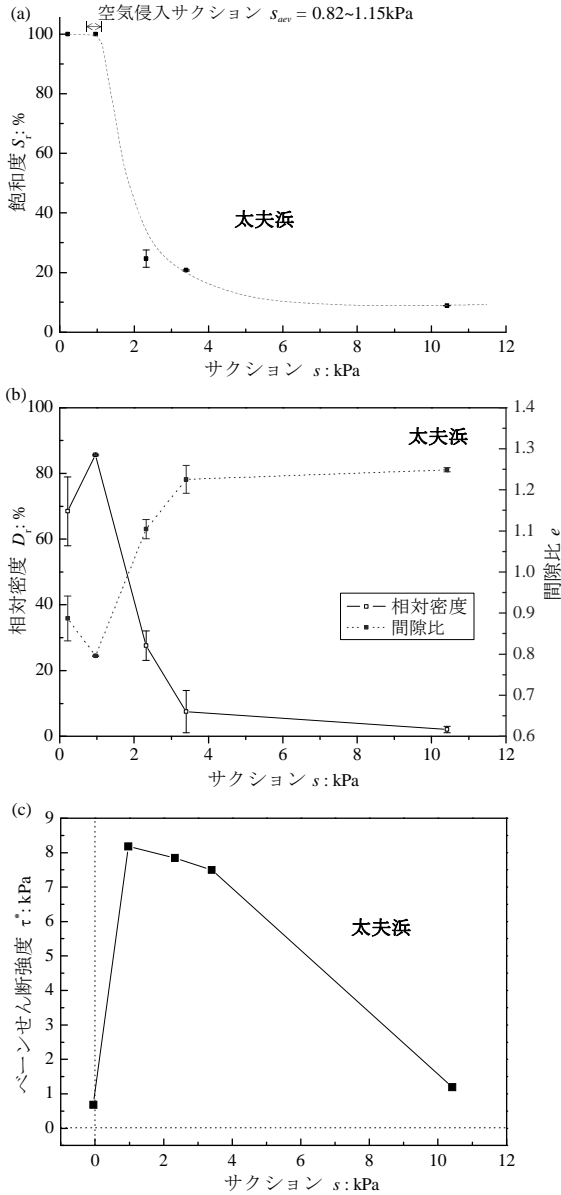


図-22 太夫浜の生物住環境特性：(a) 飽和度, (b) 相対密度, (c) ベーンせん断強度とサクシジョンの関係 (I :  $\pm$  SE)

当該効果は不飽和 ( $s > s_{aev}$ ) になるにつれて次第に弱まり乾燥状態では締固まり効果はゼロになることから、上述のような砂浜潮間帯の多様な土砂物理環境の発現は、サクシジョン動態の帰結として統一的に説明することが出来る。

換言すれば、砂浜潮間帯はその一部に干潟環境を内包する極めて変化に富む生物住環境特性を有しているといえる。

(2) 小型甲殻類の生息分布を支配する要因

各砂浜の優占3種の小型甲殻類の生息密度(平均値 $\pm$ 標準誤差)とサクシジョンの関係を図-24に示す。先ず、ナミノリソコエビについては、サクシジョン  $s$  が 2kPa を上回る領域では、いずれの海浜においても生息密度がゼロとなっている。一方、当該サクシジョン以下の領域をみると、全ての海浜を通じて、サクシジョン  $s = 1 \sim 2$  kPa の範囲で生息密度が立ち上がり始め、サクシジョンが 1kPa を下回ると急激に生息密度が上昇している。そして、全海浜を通じて、生息密度のピークが、サクシジョン  $s = 0.3 \sim 0.5$  kPa のきわめて狭い範囲に集中していることがわかる。また、ヒメスナホリムシについては、全海浜を通じて、 $s > 5$  kPa において生息密度がゼロであり、サクシジョン  $s = 4 \sim 5$  kPa の範囲で生息密度が立ち上がり始めるとともに、生息密度のピークが  $s \approx 2$  kPa に集中していることがわかる。この際、個体密度が低い太夫浜では有意なピークが現れていないことも確認することができる。また、ヒゲナガハマトビムシについては、 $s > 10$  kPa において生息密度がゼロとなっており、 $s \approx 5$  kPa においてピーク密度が現れていることがわかる。

以上の結果は、3海浜を通じた優占3種の小型甲殻類について、生息密度がゼロの生息限界域 (CR)、ならびに、生息密度の有意なピークが現れる最適域 (OP) が、生物ごとに特有のサクシジョン場において現れ、かつ、その値が砂浜に依らず一致することを明確に示している。本結果は、生物住活動の最適・限界条件をサクシジョンが支配していること(佐々・渡部, 2006a,b; Sassa and Watabe, 2008), ならびに、本報告の3章で記したように、巣穴底生生物はサクシジョン場を探知し選択する能力を有している事実と良く

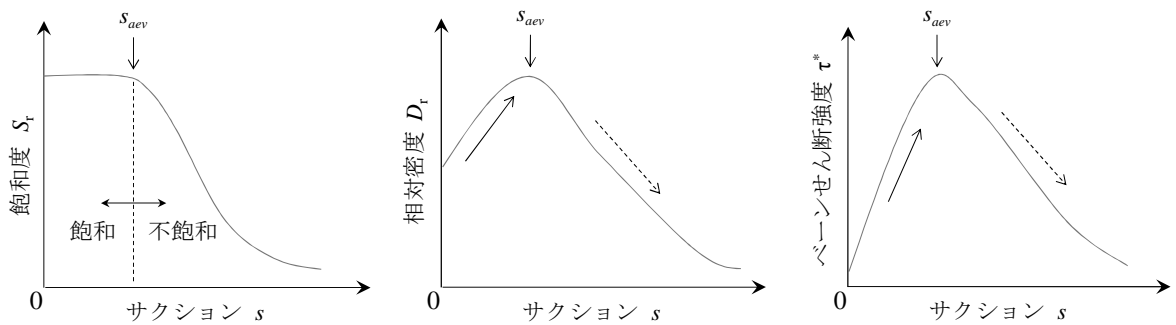


図-23 空気侵入サクシジョンを基準としたサクシジョンによる砂浜生物住環境の変化特性



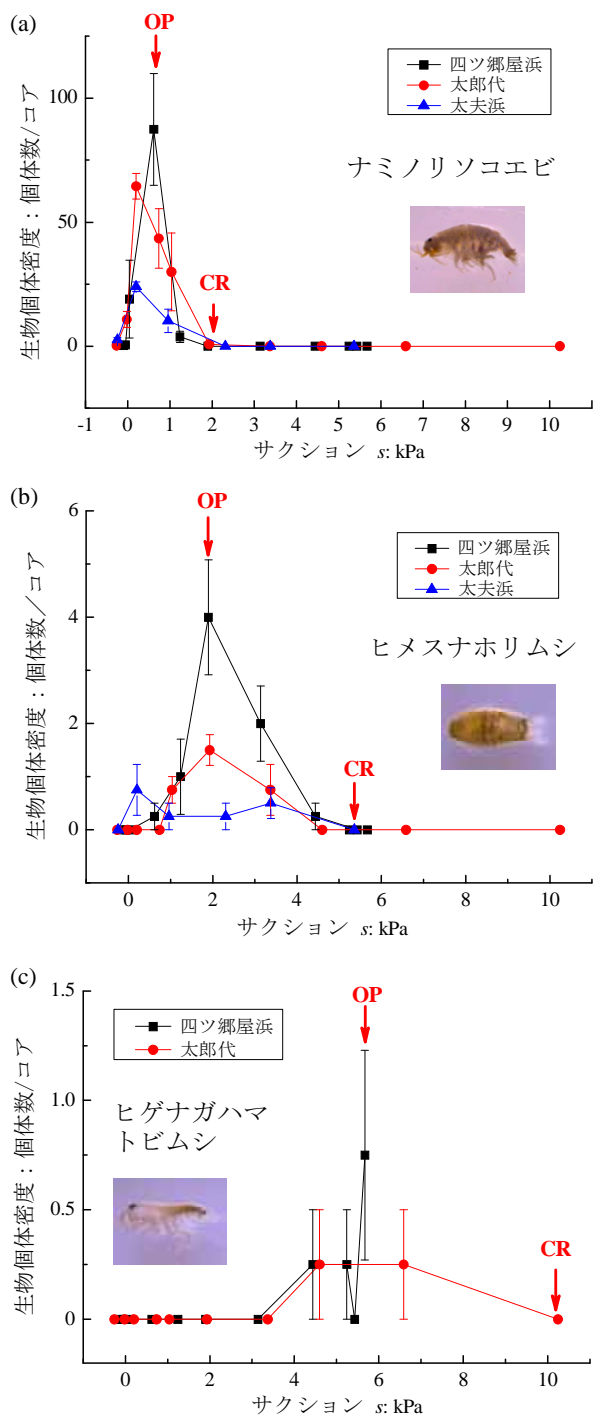


図-24 3 海浜の優先 3 種の小型甲殻類の生息密度分布とサクシジョンの関係 (工: ±SE)

整合するものである。また、梶原・高田 (2008) は、ナミノリソコエビと四ツ郷屋浜の土砂を用いた一連の生物応答実験を実施し、地下水位が -100mm よりも深くなると潜砂活動が不可能となることを報告している。当該地下水位で土砂は実質飽和状態にあり、地下水位とサクシジョンの 1 対 1 の線形関係が成り立つ (佐々ら, 2007) ことから、当該

実験結果は、サクシジョンが 1kPa を上回ると生息密度が急低下する上述の現地観測事実とよく整合しているといえる。

#### 4.4 まとめ

本章では、生態／土砂物理の関わりに着目して筆者らが開拓・推進してきた生態地盤学手法を新潟県の 3 つの海浜に展開し、現地土砂環境／底生生物分布の一体調査と一連の室内試験および分析を行った。その結果、砂浜の種類やタイプに依らず、空気進入サクシジョン値を基準としたサクシジョンが砂浜潮間帯の飽和・不飽和、緩密、硬さ軟らかさ等の多様な生物住環境の発現を支配していること、そして、全海浜を通じた優占 3 種の小型甲殻類の生息限界域と高密度域の分布が、多様な生物住環境とともに生物住活動の最適・限界条件を支配するサクシジョンによって統一的に規定しうることを初めて明らかにした。

### 5. 多種多様な生物住環境診断チャートの作成と検証

#### 5.1 はじめに

海の生物多様性は、人類がその恵みを享受し持続的に発展していく上で重要である一方、その保全・回復を実現するには基盤となる知見が大きく欠けていることが課題となっている (COP10, 2010)。本章では、本報告の序論および 2 章～4 章において記述した生態地盤学手法を、生物多様性を構成する多種多様な節足・軟体・環形動物に展開し、その住活動性能を系統的に明らかにする。そして、生物種に対応した土砂環境の適合場・不適合場の相互関係を体系的に評価しうる生物住環境診断チャートを作成し、多種多様な生物生態と生物住環境の関わりについて、日本各地の自然・造成干潟における土砂環境／底生生物分布の一体調査と一連の室内試験を通じて詳しく検証することを目的としている。

#### 5.2 多種多様な生物住活動性能実験と生物住環境診断チャート

干潟の生物多様性を構成する重要・貴重種であり住活動の形態 (図-25) が顕著に異なる二枚貝 (アサリ, シオフキ), 多毛類 (ゴカイ, チロリ), カニ (コメツキガニ), エビ (テッポウエビ) および甲殻十脚類 (スナモグリ) を対象として、一連の生態地盤実験を実施することによって、生物住活動性能の統一比較を実現している。この際、コメツキガニとアサリについては、それぞれ、筆者らが既に明らかにした巣穴活動性能 (Sassa and Watabe, 2008) と本報告の 2 章で明らかにした潜砂性能を、本章で構築する同



多様な生物住活動

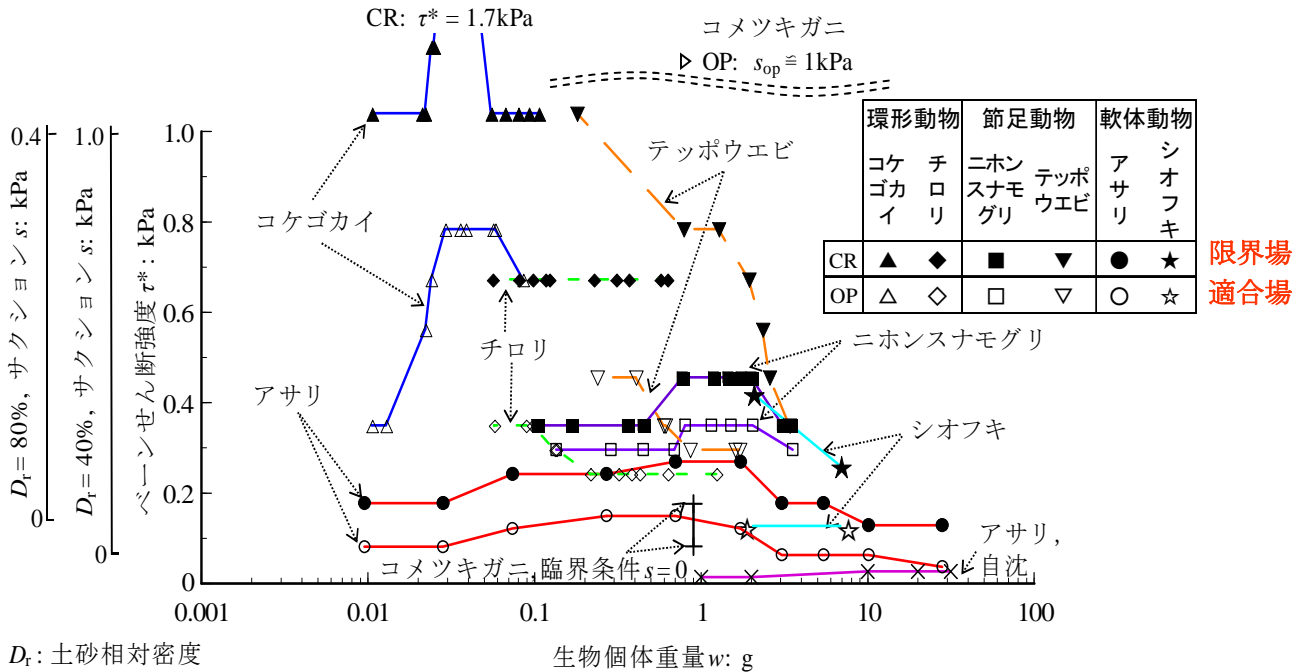
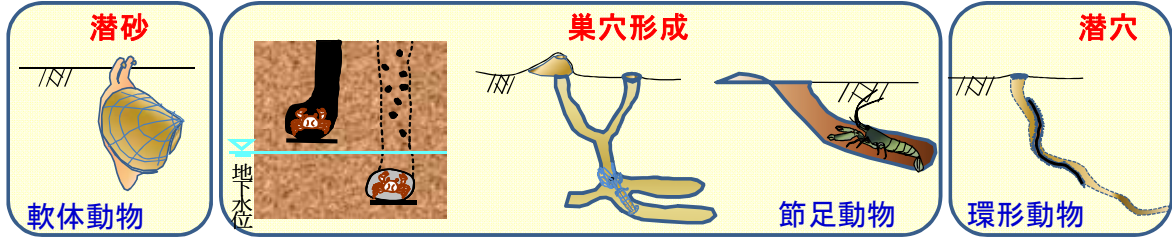


図-25 多種多様な干潟底生生物の生物住環境診断チャートと適合・限界場の相互関係

じ基盤ののせて考察している。地盤材料には、天然の干潟土砂とともに、これまでの研究でその有効性を実証している海水寒天(佐々ら, 2009)を併せて用いた。一連の生態地盤実験では、気温(20.8±1.2°C)、水温(19.5±1.8°C)、塩分(2.7%)等の大気・水環境を統一し、干潟土砂では地下水位変化に伴う地表サクシオンならびに相対密度を、海水寒天ではその濃度を適切に設定することによって、表層(10mm)のせん断強度を変化・制御した上で、各種生物の住活動の可否を一定時間(1時間)、生物個体ごとに系統的に調べた。この際、住活動可とは、全身が地表面下に入り潜穴・巣穴形成を実現した状態を、住活動不可とは、全身が地表面上に留まった状態を表している。一方、二枚貝及びテッポウエビについては、同時間内に部分的な潜砂又は

部分巣穴形成の形態が現れたため、住活動の可否を明確化するために6時間にわたり調べている。各種生物は各地の自然干潟(盤州干潟、江奈干潟、野島干潟、風蓮湖干潟)から採取し、気温・水温を上記一定に保持した室内海水槽で約1ヶ月間の馴致した後に、実験を行った。同実験には、大きさ2mm~88mm、重量0.004g~31.6gまでの、計835生物個体を用いた。

本実験結果のまとめを図-25に示す。同図は、全個体が住活動可能な適合領域(OP以下の強度域)と、住活動の可否の選別が始まる遷移領域(OPとCRの間の強度域)ならびに、全個体が住活動不可となる限界領域(CR以上の強度域)を、生物種ならびにその成長段階(重量)ごとに示したものである。同図の横軸は、干潟底生生物の全重量

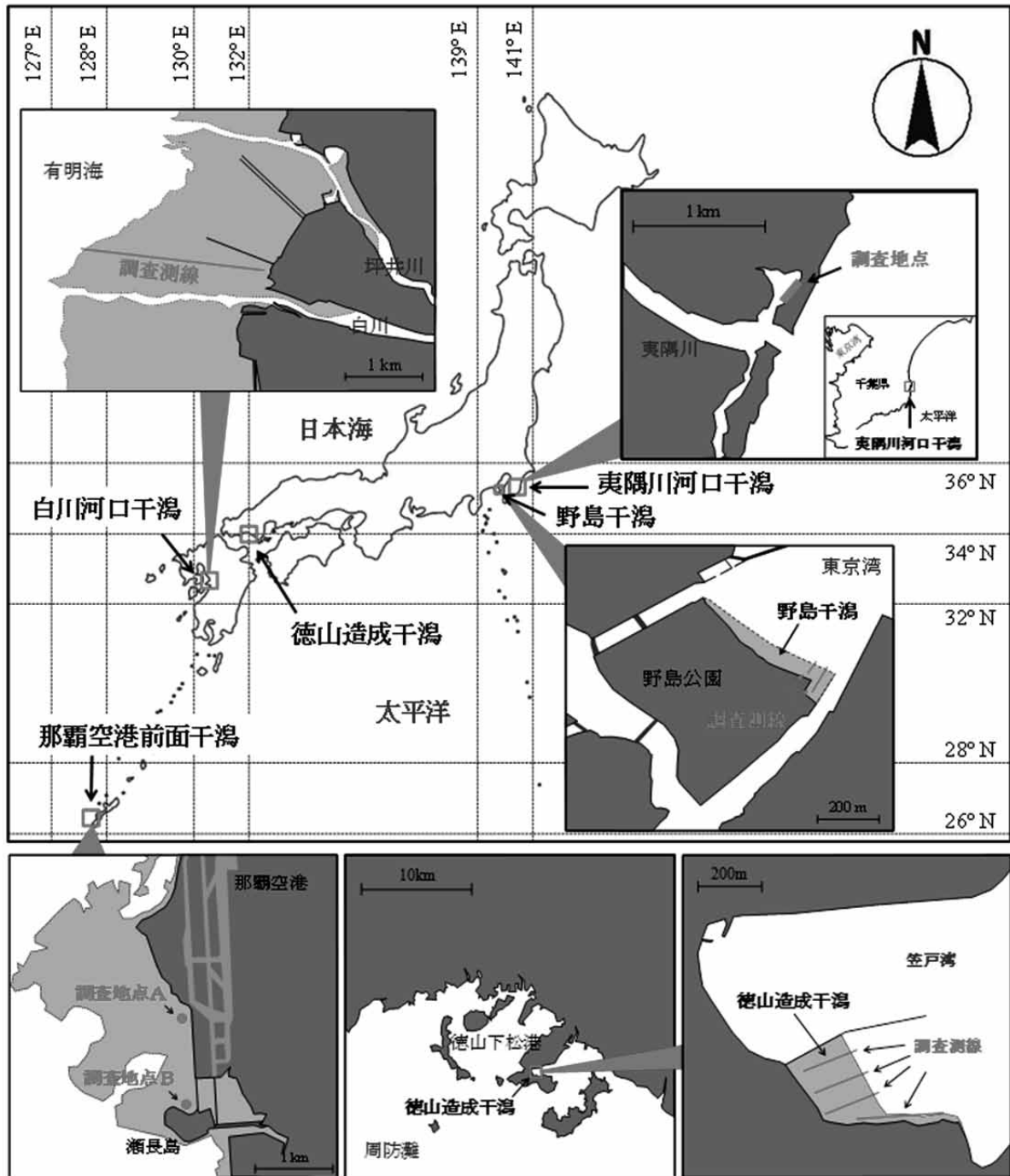


図-26 現地調査を行った日本各地の自然・造成干潟と各干潟における調査地点および測線

範囲を含む 0.001g～100g までの生物個体重量  $w$ ，縦軸は，  
 ベンセン断強度  $\tau^*$ ，ならびに，用いた干潟土砂のキャ  
 リブレーション結果に基づく相対密度  $D_r = 40\%, 80\%$  お  
 よびサクシオン  $s$  を表している。また，同図中の臨界条件  
 とは，コメツキガニが，サクシオンなしには巣穴を形成で  
 きない状態を表している。同図から，潜穴，巣穴形成，潜  
 砂のような住活動の形態や生物個体の成長段階・重さによ  
 らず，生物住活動の適合場・限界場が全ての生物種を通じ

て存在し，かつ，それらが生物種間で相互に複雑に異なっ  
 ていることがわかる。

以下では，このような生物住環境診断チャートについて，  
 全国各地で実施した現地調査結果を基に詳しく検証する。

### 5.3 自然・造成干潟における土砂物理環境／底生生物 分布の一体調査と室内試験

本研究では，2009 年から 2011 年にかけて，図-26 に示

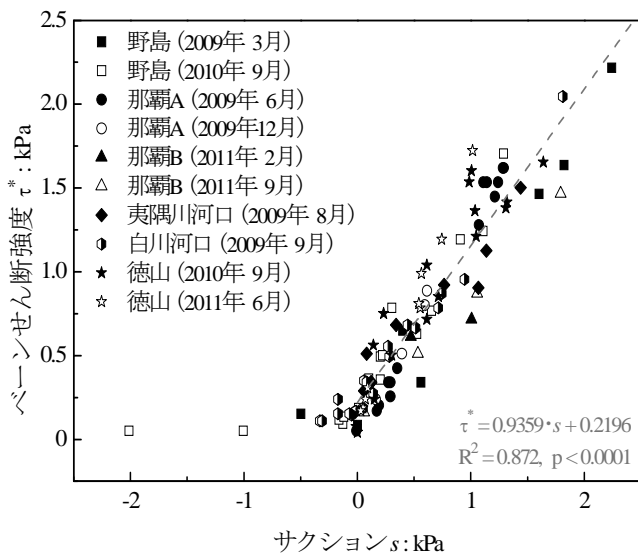


図-27 5つの自然・造成干潟におけるベーンせん断強度とサクシオンの関係

す日本各地の5つの自然・造成干潟で現地調査を行った。具体的には、神奈川県野島干潟（2009年3月、2010年9月）、熊本県白川河口干潟（2009年9月）、千葉県夷隅川河口干潟（2009年8月）、沖縄県那覇空港前面干潟（那覇A、2009年6月、12月；那覇B、2011年2月、9月）、および山口県徳山造成干潟（2010年9月、2011年6月）の大潮最干時に土砂物理環境と底生生物分布の一体調査を実施した。この際、各干潟において、サクシオン  $s$ 、地下水位、土砂硬さを表すベーンせん断強度  $\tau^*$  の空間分布を計測し、表層土砂の不攪乱試料に対して各種の室内試験を実施し、現地土砂の粒度分布、含水比  $w$ 、土粒子比重  $G_s$ 、間隙比  $e$ 、相対密度  $D_r$  および飽和度  $S_r = G_s \cdot w / e$  を得た。合せて、白川干潟では、各地点において、4つのコアサンプル（直径200mm、深さ100mm）を採取しアサリとシオフキの成長段階ごとの生息密度分布（平均値  $\pm$  標準誤差）を、那覇空港前面干潟（那覇A,B）と夷隅川干潟ではコマツキガニとニホンスナモグリの巣穴密度分布を、徳山造成干潟では節足・環形・軟体動物門ごとの生物種・個体密度・湿重量を計測・同定した。そして、これらの現地調査と室内試験を通じて得られた底生生物分布と土砂物理環境を突合せて、上述の新たに構築した生物住活動診断チャートに照らして分析・考察した。

#### 5.4 調査・試験分析結果と考察

干潟のサクシオンを核とした土砂環境動態は、多様な底生生物の住環境の形成に本質的な役割を果たしている

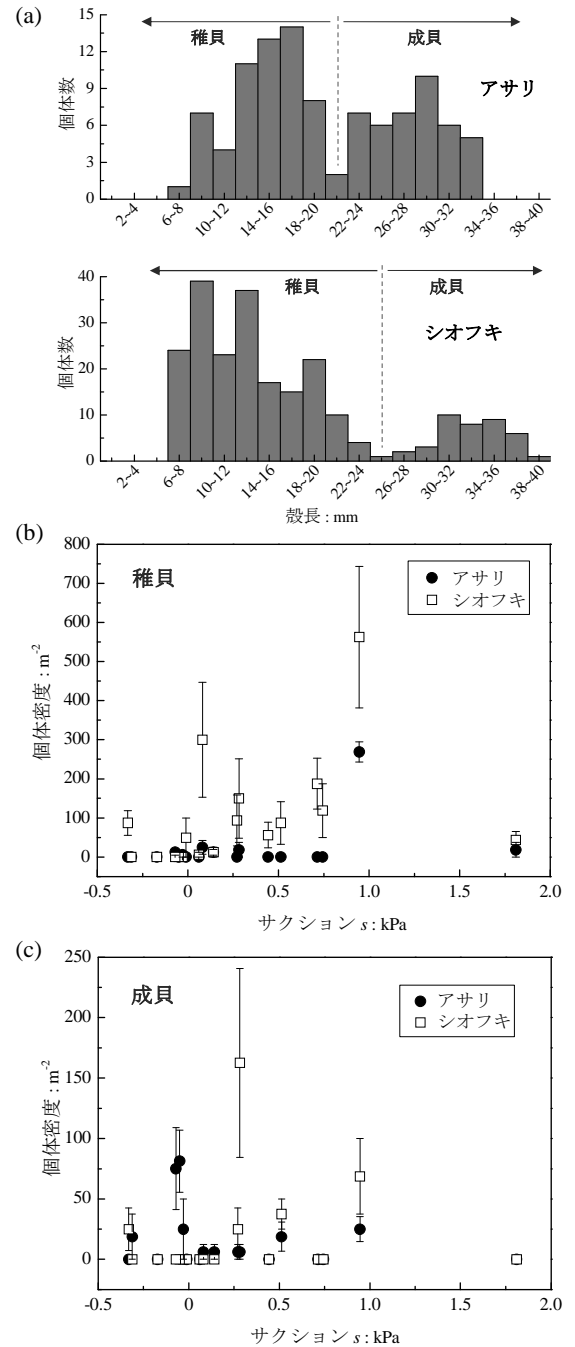


図-28 白川河口干潟におけるアサリとシオフキの稚貝・成貝の個体密度とサクシオンの関係

(Sassa and Watabe, 2007). すなわち、サクシオンの有効応力としての働きとサクシオン動態による土砂高密度化の双方の効果の重ね合わせによって、図-27 に示すように、自然・造成環境の場の種類や時期によらず、干出時に実質飽和状態にある干潟地盤表層のサクシオンと硬さの間には非常に強い相関があり、本報告の2章での記述と整合して、ベーンせん断強度にして約20–50倍の生物住環境の顕著な変化が生じていることが裏付けられる。

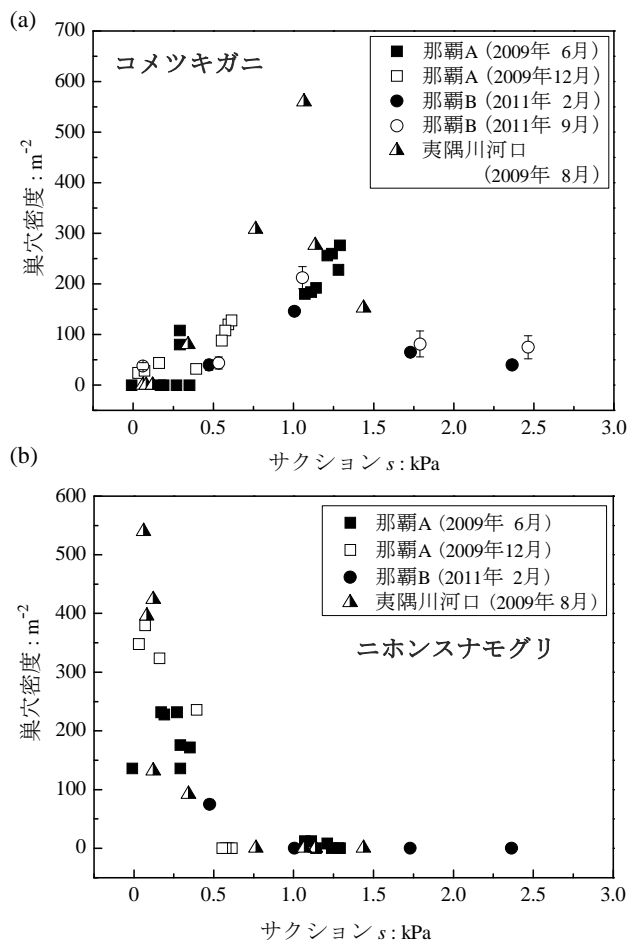


図-29 異なる3つの干潟におけるコマツキガニとニホンスナモグリの巣穴密度とサクシジョンの関係

図-28は、白川河口干潟におけるアサリ・シオフキの成貝・稚貝の個体密度分布(平均値±標準誤差)とサクシジョンの関係を示したものである。この際、それぞれの二枚貝の殻長分布から、成貝と稚貝を図-28(a)のように分類している。図-28(b),(c)より、アサリ・シオフキとも、稚貝はサクシジョンが発達した領域においても生息しているのに対し、成貝になると、とりわけアサリにおいて、個体密度のピーク域が、サクシジョンが低い又は発達しない水際の領域にシフトしていることがわかる。これは、本報告の2章で述べた知見とも合致するものである。また、シオフキの成貝の個体密度のピーク域は、アサリよりもサクシジョンがやや発達した土砂環境域に存在していた。これらの調査結果は、アサリの潜砂性能が殻長20mm(湿重量約1.5-2g)を超えると顕著に低下し、サクシジョン動態により密になった地盤で有効に潜砂できなくなることを、一方、シオフキの成貝の適合場はアサリを上回ることを示す生物住環境診断チャート(図-25)とよく整合している。

図-29は、那覇空港前面干潟と夷隅川河口干潟のコマツキガニとニホンスナモグリの巣穴密度とサクシジョンの関係を示している。同図より、調査場所や時期によらず、両底生生物とも、それぞれに特徴的な土砂環境場、すなわちコマツキガニはサクシジョンが約1kPa、ニホンスナモグりはサクシジョンが約0.2kPaで生息密度が急増していることがわかる。これらの生息密度のピーク域は、コマツキガニの適合場がニホンスナモグリのそれを大きく上回ることを示す同チャート(図-25)と定量的に調和している。さらに、筆者らは、本報告の3章において、現地のサクシジョン動態による土砂の高密度化を踏まえた適合サクシジョン場  $s_{op} \cong 1\text{kPa}$  に集中するかたちで土砂環境の選択行動と顕著なパッチ形成が生じることを実験的に明らかにしており、上述の現地調査分析結果はその一般性を示しているといえる。

図-30は、徳山造成干潟における環形・軟体・節足動物の個体密度とサクシジョンの関係を示している。本調査の時期は、造成1年半後であり、造成後未だまもない時期に対応している。また、同図中の  $s_{aev}$  値は、各調査地点(20地点)での不攪乱サンプリングと室内試験によって得られた実測飽和度に基づく空気侵入サクシジョン値を表している。本図より、サクシジョンが空気侵入サクシジョン  $s_{aev}$  値を上回り不飽和状態となると、全ての動物門を通じて生物密度が急低下しており、生物生息における保水性の重要性が裏付けられる。実質飽和状態では、全域で特に高いサクシジョン域において、軟体動物・節足動物に比べて、環形動物とりわけコケゴカイの個体密度が最大35000m<sup>-2</sup>と群を抜いて高くなっている。このことは、コケゴカイの住活動性能が他種に比べて格段に高く初期移入種としての特性を示す生物住環境診断チャート(図-25)とよく対応するものである。

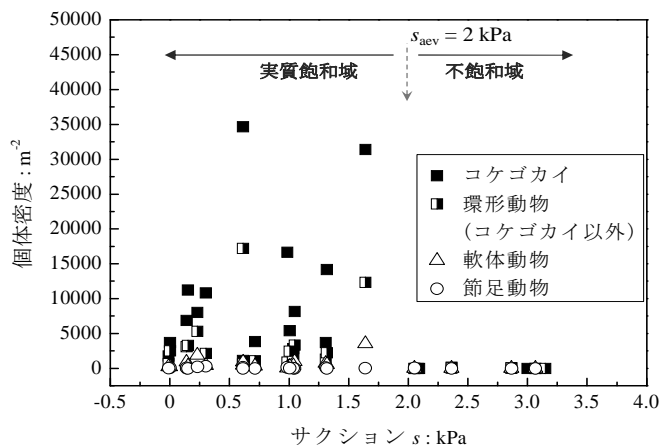


図-30 徳山造成干潟における造成初期段階の環形・軟体・節足動物の個体密度とサクシジョンの関係

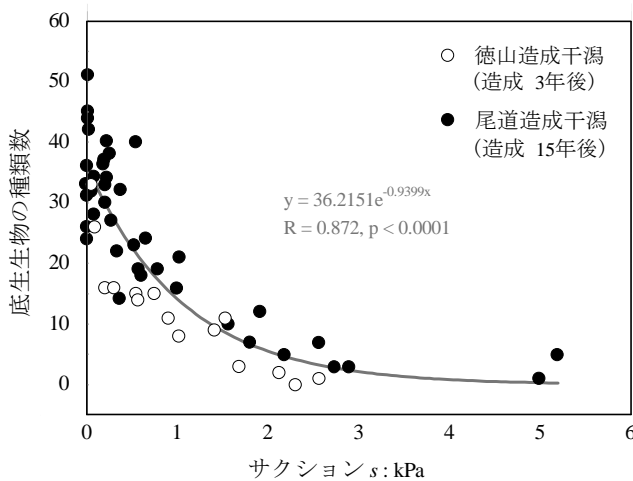


図-31 2つの干潟造成事業における底生生物の多様性とサクシジョンの関係

図-31は、造成3年後の徳山造成干潟における底生生物の種類数とサクシジョンの関係を示したものである。同図中には、造成15年後に国土交通省中国地方整備局によって実施された尾道造成干潟における調査結果も合せて示している。

本結果から、生物多様性とサクシジョンの間には極めて密接な関係があることがわかる。このことは、多種多様な干潟生物の適合・限界場をサクシジョンを核とした土砂環境場が支配していること、ならびに、サクシジョン・土砂硬さの上昇に対して適応できる生物種数が低下することを示した生物住環境診断チャート(図-25)とよく整合しており、その有効性を裏付けている。それゆえ、図-31の結果は、このような生物種による適合・限界土砂環境場の顕著な違いが、多様な底生生物の生息分布の形成に大きく寄与していると理解することができる。

### 5.5 まとめ

本章では、多種多様な干潟底生生物の住活動と土砂物理環境の関わりを一連の生態地盤実験を通じて系統的に調べることによって、潜穴、巣穴形成、潜砂等の住活動の形態や生物個体の大きさ・重さの違いに依らず、生物住活動の適合場と限界場の両者が生物種ごとに存在することを世界で初めて明らかにした。そして、上述の生物適合場と限界場の生物種間の複雑な相互関係を現地土砂環境に照らして浮き彫りにする生物住環境診断チャートを構築した。

さらに、同チャートに照らして、熊本県白川河口干潟、千葉県夷隅川河口干潟、沖縄県那覇空港前面干潟、および

山口県徳山造成干潟における土砂環境／底生生物分布の一体調査と一連の室内試験を実施し、これまで未解明に留まっていた多種多様な干潟生物の生息分布と住み分けの実態が、同チャートときわめて良く整合していることを明らかにした。

## 6. 潮間帯砂州地形の動的安定原理と覆砂・浅場造成高の最適設計

### 6.1 はじめに

多種多様な生物生息にとって、地形動態の安定性は重要不可欠である。河口・沿岸域に発達する砂州(バー)は、波を砕きその背後の干潟・海岸を侵食から護る重要な役割を担っている。このため、砂州地形動態の理解を目的として、波や流れの水理動態と関連する土砂輸送過程について、これまでに広く研究がなされてきた(例えば、古川ら, 2000; Hoefel and Elgar, 2003; Masselink et al., 2006; Ruessink et al., 2007; Yamada and Kobayashi, 2007)。通常の沿岸砂州は、嵐の際に沖側に移動し穏やかな波浪下で岸側に張りバームを形成する特性を有する。しかし、潮汐変動により干潟を繰り返す干潟の砂州地形は、幾度の台風や暴波浪を経験しても“動かない”, すなわち土砂移動の観点から十分に厳しい波浪条件下でも極めて安定していることが長年の謎とされており、その動的安定性は世界の研究者の注目を集めてきた(Masselink et al., 2006)。

従来は、専ら波や流れなどの水理的な外力に注目して研究がなされてきたが、佐々・渡部(2008)は、このような地盤上の水理とは顕著に異なる地盤内部の土砂物理の役割に着目し、土中水分張力を表し大気圧を基準とした負の間隙水圧によって定義されるサクシジョンの動態が、繰り返して干出・冠水する土砂の間隙および表面せん断強度の顕著な時空間変化を引き起こしていること(Sassa and Watabe, 2007)に鑑み、国内外での一連の現地観測・調査、室内模型実験ならびにモデル化・数値解析を通じて、上述のような潮間帯砂州の動的安定性がサクシジョン動態による繰り返し弾塑性収縮効果と漂砂・地形変動の相互作用によってもたらされることを世界に先駆けて見出した(Sassa and Watabe, 2009)。

本章では、本報告の序論および2～5章に記述した知見と背景に基づいて、東京湾葛西沖の浅場に造成された干潟砂州の地形動態—土砂環境場—生物個体群—地盤構造の一体調査と各種の室内試験および解析を実施し、上述の潮間帯砂州の動的安定原理について詳しく検証するとともに、生物多様性と地形安定の両立を実現しうる新たな工学指針を得ることを目的としている。

## 6.2 潮間帯砂州地形の動的安定原理

本節では、まず、Sassa and Watabe (2009) が明らかにした潮間帯砂州地形の動的安定原理について記述する。

(1) 波・流れに対する潮間帯砂州地形の動的安定性

潮間帯の砂州（バー）は、一般に、その高さや勾配に応じて、主に次の3つのタイプに分類される：すなわち、1. slip-face bars, 2. low-amplitude ridges, および 3. sand waves である（図-32(a)）。タイプ1のSlip-face barsは、バー高さが大きい最も動的なバーである。このタイプのバーは、潮下帯のバーと同様に、嵐の間に沖側に移動しその後の穏やかな波浪条件下で岸側に戻る特性を有する。これとは対照的に、タイプ2、特に干潟バー地形に相当するタイプ3のバーは、バー高さが抑制された非常に安定した地形である。これまでに、水理動態特性に関する長周期重複波や多段碎波等の様々な推測がなされてきたものの、これらのバーの動的安定性の起源は、従来未解明に留まってきた(Masselink et al., 2006)。

冠水した潮間帯のバーは、潮汐による水位変化を通じて、一連の波浪過程を経験する（図-32(b)）。これにともない、岸沖方向の漂砂は、岸側・沖側の双方に繰り返し変動するため、時間的空間的に非定常であることが知られている（図-32(b)）。

以下では、潮間帯バー地形の動的安定性を示す2つの典型的な事例について記述する。図-33(a)は、東京湾の小櫃川河口に位置する盤州干潟において1994～2000年の7年間にかけて実施した現地調査結果(古川ら, 2000)を示し

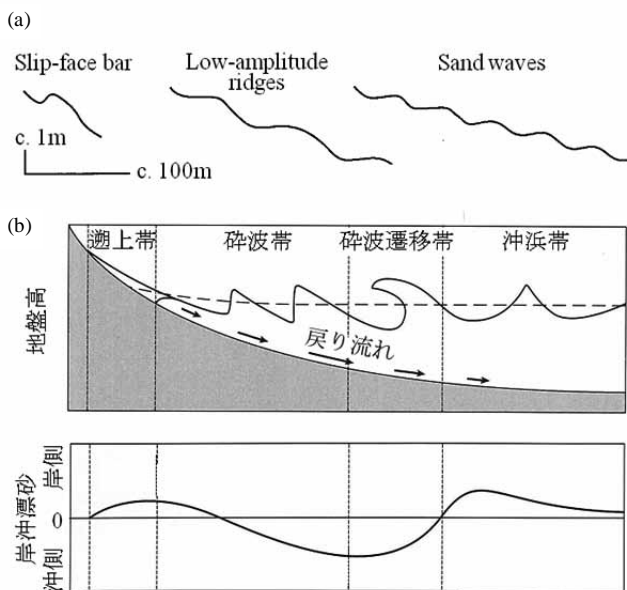


図-32 (a) 潮間帯バーの3つのタイプ；(b) 波・流れと岸沖漂砂の形態 (Masselink ら, 2006)。

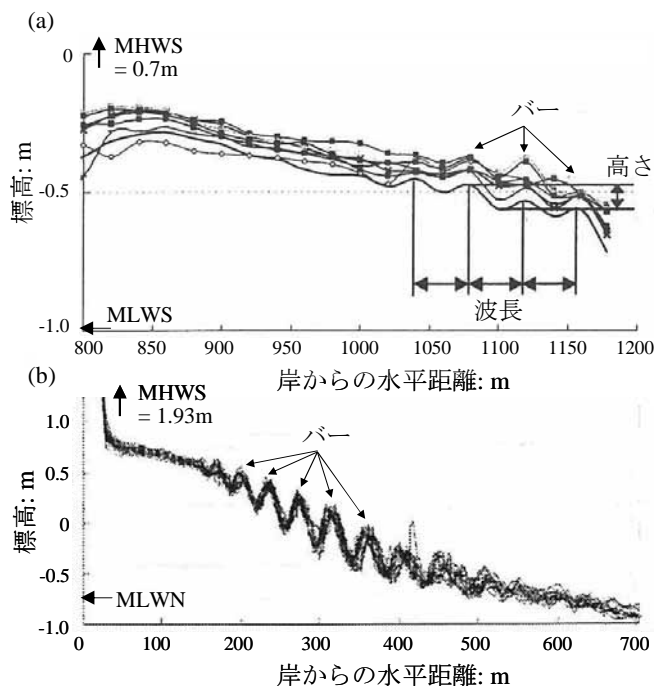


図-33 潮間帯バー地形の動的安定性を示す現地調査結果：  
 (a) 盤州干潟（古川ら，2000）；(b) 御奥来海岸（Yamada and Kobayashi, 2007）。MHWS：大潮平均高潮位，MLWN：小潮平均低潮位。

ている。当該干潟の土砂は、中央粒径  $D_{50} = 0.17 \sim 0.23 \text{mm}$  の細砂である。本図より、約 1/1000 の緩勾配上にバー高さ 0.1～0.2m、波長 40m の多段バー地形が潮間帯下部に存在していることがわかる。本干潟は、年平均 0.04m の割合で正味の堆積傾向 (Uchiyama, 2007) にあり、地盤高は経年的に変動している。それにも関わらず、バーは常に同じ位置に留まっていることがわかる。

図-33(b)は、有明海の御奥来海岸において2003～2005年の3年間に26回の現地調査を実施した結果 (Yamada and Kobayashi, 2007) を示している。当海岸の土砂は、中央粒径  $D_{50} = 0.12 \sim 0.33 \text{mm}$  の細砂である。本図より、約 1/300 の緩勾配上に、バー高さ 0.15～0.5m、波長 30～50m の多段バー地形が存在しており、かつ、沖側フロント域を除いて、バーが実質的に同じ位置に留まっていることがわかる。

ここで重要なことは、上述の両調査の期間中、盤州干潟と御奥来海岸の双方とも、幾度の嵐や台風イベントを経験している事実である (古川ら, 2000; Yamada and Kobayashi, 2007)。このことは、上述の調査結果と合せて、波・流れに対する潮間帯砂州地形の動的安定性を如実に示すものである。

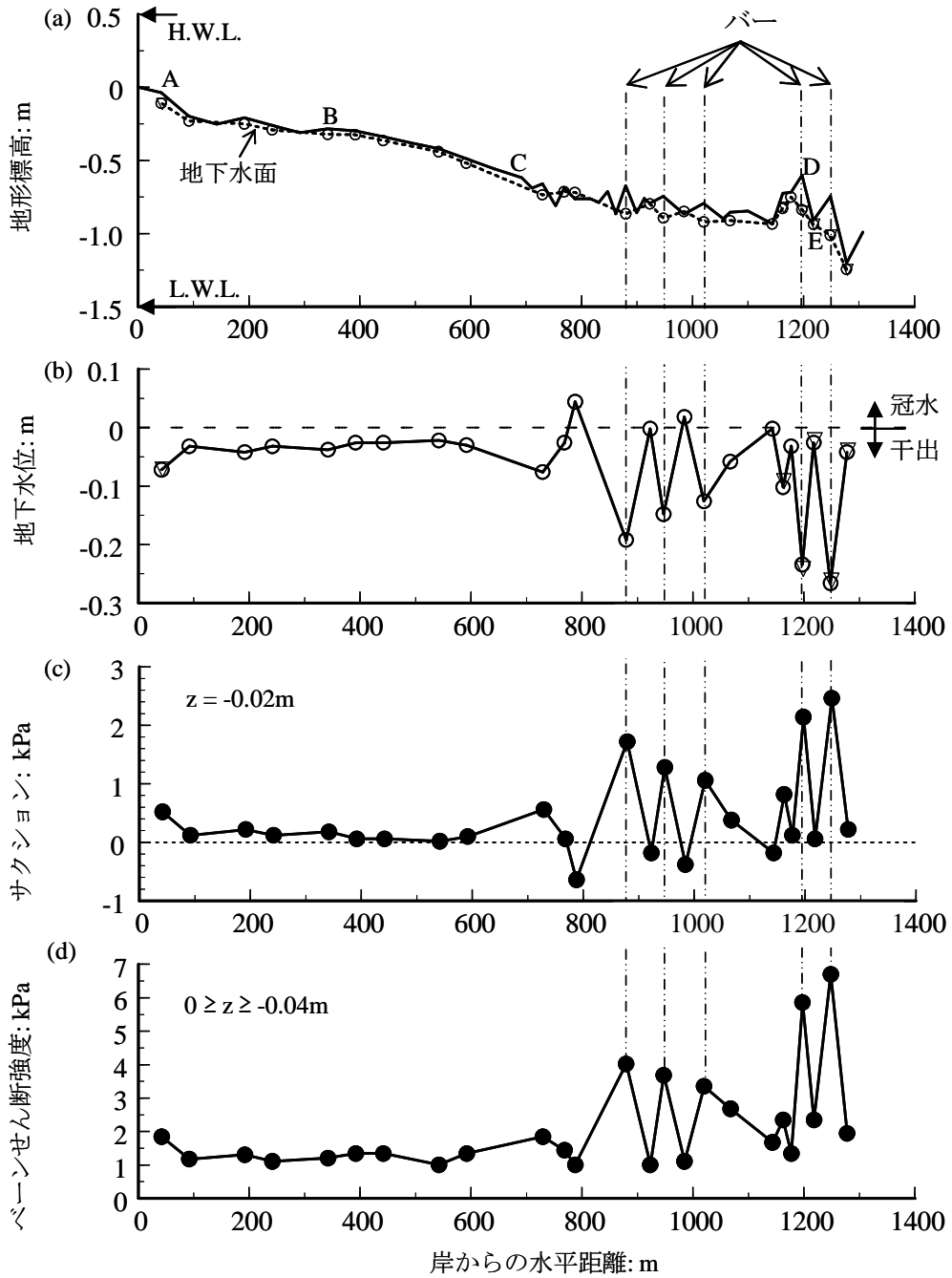


図-34 潮間帯バー地形，地下水位，サクシヨンならびに土砂表面せん断強度の間の密接な関係を示す盤州干潟における現地観測・調査結果．ここに，A～E地点は，土砂のサンプリング地点を表す．

(2) サクシヨン動態効果と漂砂・地形変動の相互作用

(a) サクシヨン動態効果

筆者らは，潮汐による地下水位変化と連動したサクシヨンの動態が，繰返し干出するも実質飽和状態を保つ土砂の著しい弾塑性収縮を引き起こした結果として，そこで作用するサクシヨン動態の厳しさに強く依存して，土砂表面せ

ん断強度の明瞭な変化をもたらすことを明らかにしている (Sassa and Watabe, 2007)．

上述のことをより具体的に示すために，図-34に，盤州干潟の土砂環境分布に関する筆者らの現地観測・調査結果を提示している．当該干潟の土砂粒径は  $D_{50} \cong 0.2\text{mm}$  と均質であるが，潮間帯下部のバートラフ地形に応じて，地



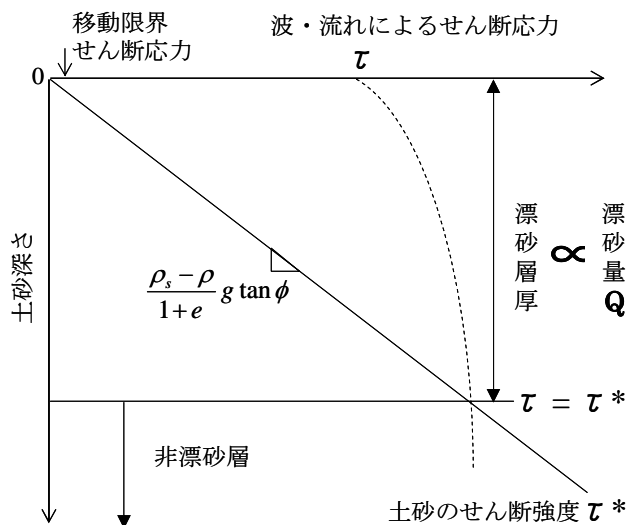


図-35 波・流れによるせん断応力と土砂のせん断強度の両者に依存する漂砂量. ここに,  $\rho$  は水密度,  $\rho_s$  は土粒子密度,  $e$  は土砂の間隙比,  $\phi$  は土砂の内部摩擦角を表す.

下水位が顕著に変化していることがわかる(図-34(a)(b)).  
 このような地下水位の空間変化は, 干出時に土砂が飽和状態に保たれる条件(佐々ら, 2007)下で, 表層土砂のサクシオン発達性状に直接的に反映される(図-34(c)).  
 これにより, 潮汐作用下で, バーは, トラフに比べて, より大きな地下水位変動すなわちより厳しいサクシオン動態を経験し密になった結果, 著しく高い表面せん断強度を發揮する(図-34(d)).

このようなサクシオン動態による繰返し弾塑性収縮をもたらすバートラフの堆積構造の顕著な差異は, 高精度表面波探査や表層土砂の不攪乱サンプリング及び土砂物理試験の連携によっても確かめられている(Watabe and Sassa, 2008).

結局, 上述のサクシオン動態効果は, 土砂の表面せん断強度分布とバートラフ地形の地盤高分布の間に密接な関係をもたらしている(図-34).

(b) 漂砂・地形変動に及ぼすサクシオン動態効果の理論モデル化と解析

波・流れによる表面せん断応力が土砂の移動限界せん断応力を上回ると, 土砂は動き出す. そして, より厳しい条件下で, 漂砂層厚ならびに漂砂量は増大し, その度合いは, 漂砂層底面で常に成立する関係, すなわち, 当該面に波・流れにより動員されたせん断応力が土砂のせん断強度に一致する関係によって規定される(Nielsen, 1992). このこ

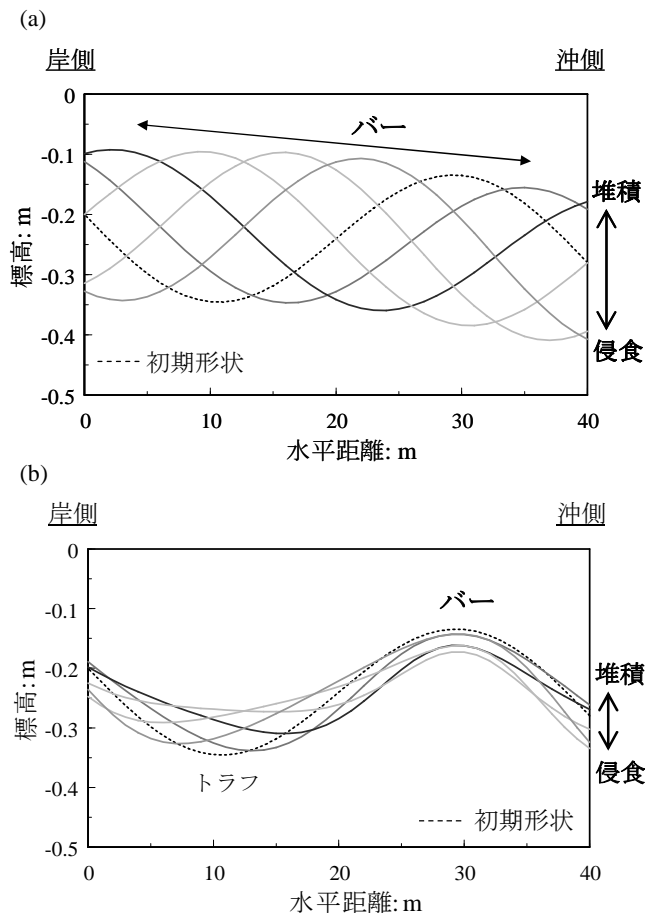


図-36 潮間帯バー地形動態の解析結果:(a) サクシオン動態効果無し; (b) サクシオン動態効果有り.

とは, 図-35に示すように, 漂砂量が, せん断応力と土砂のせん断強度の双方に依存する関数であることを表しているが, これまで, 波・流れによるせん断応力の時間的空間的变化については, 目覚ましい研究の進展があった一方, 従来の漂砂モデルでは, 土砂のせん断強度は時間的空間的に固定されてきた(Hoefel and Elgar, 2003; Hsu and Hanes, 2004; Masselink et al., 2006; Ruessink et al., 2007). しかし, 筆者らは, 上述のように, 潮間帯の土砂では, サクシオン動態効果によって顕著な表面せん断強度の変化が現れることを明示した.

以下では, このような漂砂と地形動態に及ぼすサクシオン動態効果に関する簡明な物理モデルについて記述する.  
 岸沖方向  $x$  の土砂の連続式は次式によって表すことができる.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{1}{1-n} \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (6)$$

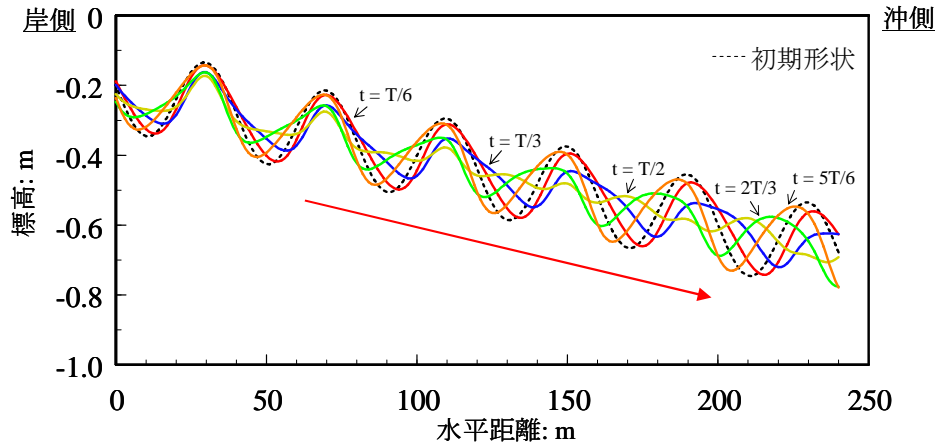


図-37 多段バー地形動態の解析結果：サクシオン動態効果 有り。

ここに、 $z < 0$  は岸側砂州の直上を基準とした地盤高、 $n$  は土砂の間隙率、 $Q$  は岸沖方向の局所漂砂量である。漂砂方向は、上述の潮間帯の水利動態特性により、周期的に変動するため、 $Q$  の最も簡明な形として次式を仮定している。

$$Q = A \cdot \sin(\kappa x - \omega t) \quad (7)$$

ここに、 $\kappa = 2\pi / L^*$ 、 $\omega = 2\pi / T$  であり、 $L^*$  は  $Q$  の岸沖変化の波長、 $T$  は  $Q$  の時間変動の周期である。 $A$  は漂砂ポテンシャルを表し、既述のとおりせん断応力と土砂のせん断強度の両者に依存するため、上述のサクシオン動態効果によるせん断強度とバートラフ地盤高分布の間の密接な関係を考慮すると、

$$A = a^* |z| \quad (8)$$

と表現することができる。ここに、 $a^*$  は土砂上のせん断応力により規定されるパラメタである。

潮間帯バー地形動態の解析を、上式(6)~(8)を用いて行った。具体的には、年サイクルで移動限界を優に上回るような波・流れ場におけるバーの動態を対象として、図-33に示した現地バー地形に鑑み設定したバーの初期地形：長さ40m、高さ0.25m、勾配1/500、および漂砂条件： $T = 1$ 年、 $L^* = 40$  m、 $n = 0.45$ 、 $a^* = 0.0075 \text{ m}^2/\text{day}$ の下で、式(7),(8)を組込んだ式(6)を差分法で解き、得られた地盤高分布を用いて式(6)~(8)を更新した。また、比較のために、式(8)において  $A = a^*$  と設定することにより、サクシオン動態効果無しの場合の解析も合わせて行った。

(c) 結果と考察

上述の物理モデルによる解析結果を図-36に示す。サク

シオン動態効果が無い場合(図-36(a))、すなわち、水利動態のみの影響下では、バー地形は、バー高さをほぼ保ちながらも侵食・堆積の繰返し作用を受けて大きく変動した。一方、サクシオン動態効果有りの場合(図-36(b))には、バー地形の挙動は一変した。すなわち、侵食・堆積による地形変動は顕著に抑制され、バー高さは変動しつつも、バー位置は同じに留まった。

上述の結果は、漂砂・地形変動に及ぼすサクシオン動態効果を簡明かつ現実的に考慮することによって、土砂移動限界を優に上回るような波・流れ外力を受ける干潟バー地形の動的安定性をよく説明できることを明示している。

ここで、このような土砂内部の物理動態の効果は、地形勾配、岸沖距離ならびに土砂粒度等の様々な要因によって変化しうることを記しておく必要がある。その一例として、岸沖多段バー動態の解析結果を図-37に示している。多段



図-38 葛西沖浅場造成地の広域図

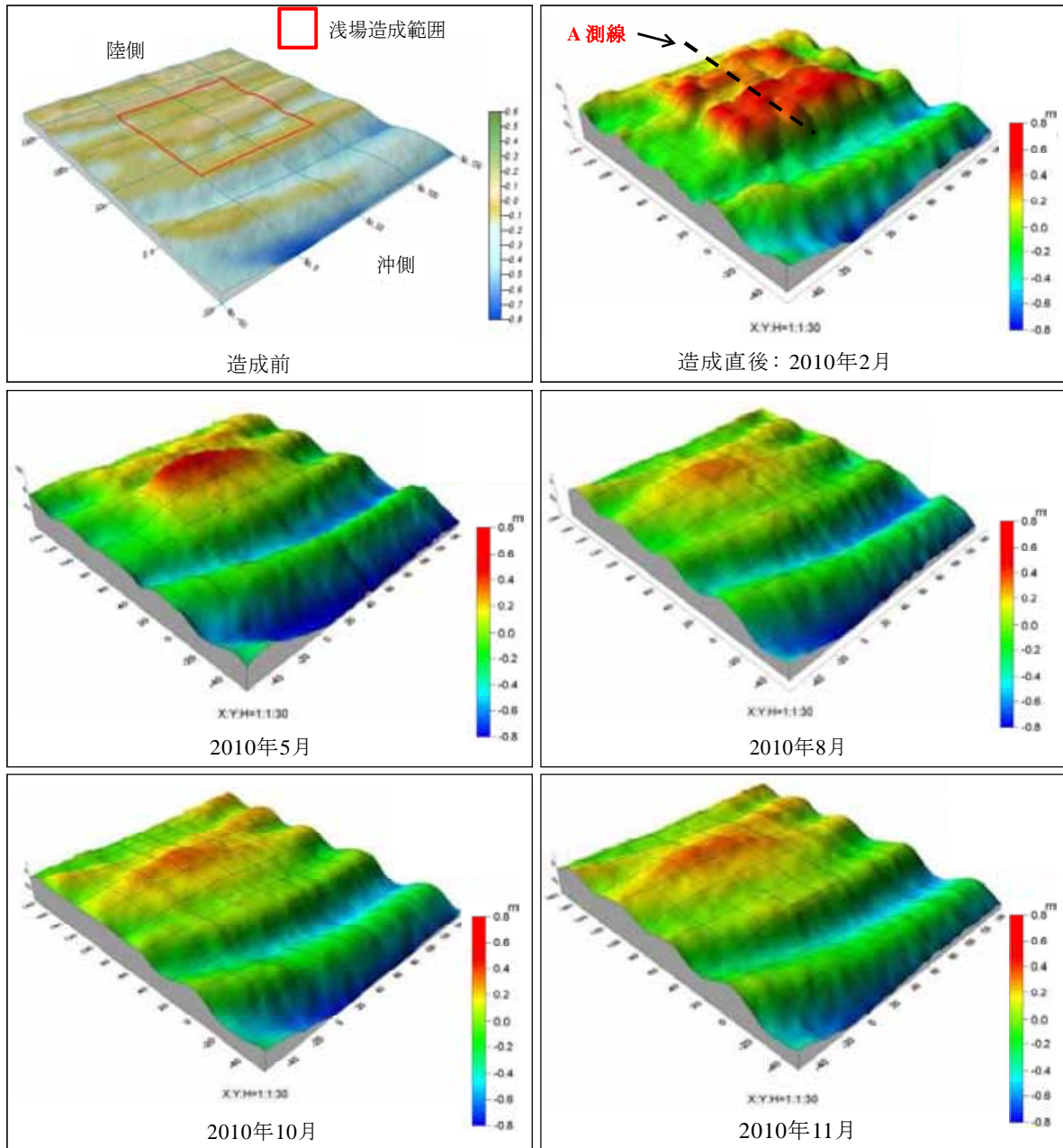


図-39 葛西沖浅場における造成干潟砂州の鳥瞰図：

(a) 造成前, (b) 造成直後: 2010年2月, (c) 2010年5月, (d) 2010年8月, (e) 2010年10月, (f) 2010年11月の地形測量結果

バーは、サクシオン動態の効果が作用する外力に対して相対的に弱くなる沖側に向かって、次第に動的な挙動に遷移していることがわかる。実際、沖側フロントでは、新たなバーの生成・移動・発達・減衰という一連の地形過程 ( $t = T/6, T/3, T/2, 2T/3, 5T/6$ ) を確認することができる。以上の解析結果は、上述の現場で経年的に観測されてきたバー地形動態の特徴ともよく整合している。

また、土砂粒度の粗さやバー高さの増大から、地下水位

が保水性を満足する限界地下水位よりも深くなり土砂が不飽和になる場合(佐々ら, 2007; 渡部ら, 2007)には、上述のようなサクシオン動態効果は相対的に弱まり、バー地形の動的変化が助長されると考えられる。

結局、上述の結果と考察は、潮間帯バーの動態予測には、土砂上に作用する水理動態とともに土砂内部の動態効果を適切に考慮することが本質的に重要となることを実証するとともに、従来、謎とされ未解明であった潮間帯バー

の動的安定性が、土砂内部のサクシオン動態効果と漂砂・地形変化のフィードバックによって現れることが明らかとなった。

### 6.3 浅場造成した干潟砂州の現地調査、室内試験と解析

上述の潮間帯砂州の動的安定原理をふまえて、東京湾葛西沖の浅場(図-38)に造成された干潟砂州の鳥瞰図を図-39に示す。この際、図-38は、葛西沖浅場における造成前の広域図を表している。岸沖・沿岸両方向100m角の造成であり、2つのパートラフで構成されている。造成前(図-39(a))と造成直後の2010年2月(図-39(b))および同年5月、8月、10月、11月に深浅測量による造成砂州の地形調査および底生生物種・個体数・湿重量の動態に関する調査を行った。そして、同年3月と8月には、上述の地形・生物調査と合せて、造成砂州の土砂環境動態と地盤構造の一体調査を実施した。具体的には、大潮干潮時に図-39(b)の代表岸沖測線Aにおいて、サクシオン $s$ 、地下水位、ベーンせん断強度 $\tau^*$ の岸沖・沿岸分布を計測するとともに、表層土砂(深さ50mm)のサンプリングを行い、得られた不攪乱試料に対して各種の室内試験を実施し、現地土砂の粒度分布、含水比 $w$ 、土粒子比重 $G_s$ 、間隙比 $e$ 、相対密度 $D_r$ および飽和度 $S_r = G_s \cdot w / e$ を得た。この際、含水比、間隙比、相対密度および飽和度は、各調査地点において実施した2回の不攪乱サンプリングによって得られた2つの試料の平均値と標準誤差を算出している。また、同岸沖測線と沿岸両方向において多チャンネル型高精度表面波探査(Watabe and Sassa, 2008)を実施し、造成砂州の地盤構造変化を同定した。そして、造成砂州を対象とした漂砂—サクシオン動態効果の連成を考慮した地形動態解析(Sassa and Watabe, 2009)を実施し、上述の各種の現地調査・室内試験結果と突合せて統合的に分析・考察した。

### 6.4 調査・試験・解析結果と考察

#### (1) 地下水位・空気侵入サクシオン・相対密度の関係

造成砂州の鳥瞰図(図-39)から、造成後の地形変化は主に岸沖方向に卓越して生じていることがわかる。また、造成1ヶ月後の砂州の粒度分布は、用いた覆砂材料に比べて、細粒分が数%減少していたものの、全体的な粒度特性は $D_{50} = 0.2\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ と概ね維持されていた。当該砂州の地下水位、空気侵入サクシオンの換算水頭値と相対密度の関係を図-40(a)に示す。同図の空気侵入サクシオン値 $s_{aev}$ は、各地の砂質干潟および砂浜において有効性が実証されてきている本報告の4章に記した式(5)によって定義されるもので、造成土砂の平均値を表している。

本図から、造成後まもない砂州において、飽和域と不飽

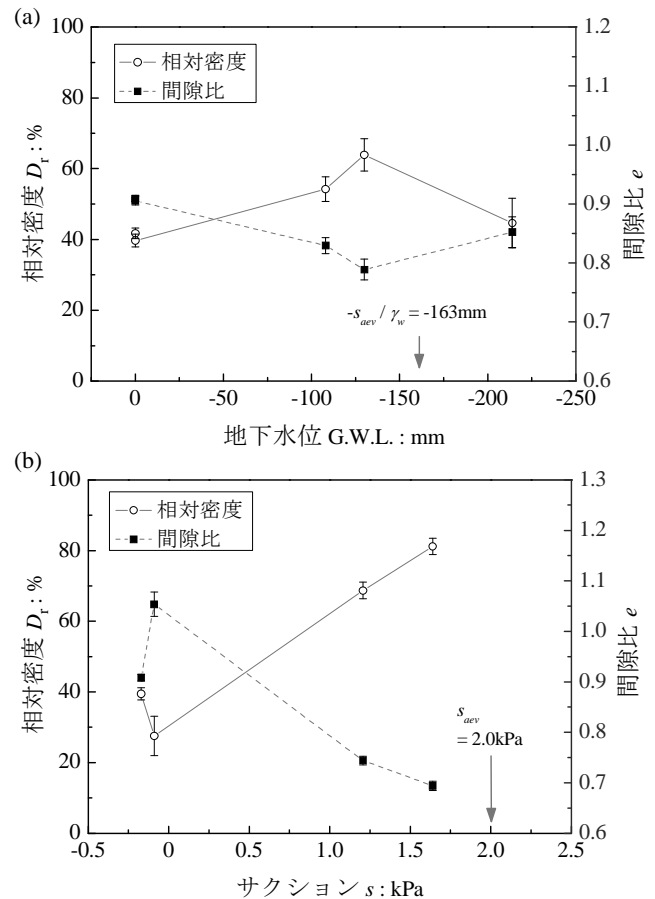


図-40 造成砂州の(a) 地下水位、空気侵入サクシオンと相対密度の関係: 2010年3月の調査・試験結果、(b) サクシオン、空気侵入サクシオンと相対密度の関係: 2010年8月の調査・試験結果

和域の双方を確認することができる。実際、砂州の水際および中腹部では飽和度 $S_r \cong 100\%$ であった一方、砂州頂上部では飽和度 $S_r = 66\%$ と顕著に低下していた。このような土中水分の保持形態は、土砂の間隙・硬軟および強度の状態に大きな影響を及ぼす(Sassa and Watabe, 2007)。すなわち、実質飽和状態では、サクシオン動態の効果によって地下水位の低下とともに間隙比は減少し、対応する相対密度も約20%上昇していることがわかる。しかし、地下水位が許容地下水位 $= -163\text{mm}$ よりも深くなると、不飽和状態となり、相対密度も40%程度と土砂は緩く留まっていることがわかる。

一方、造成半年後には、地形変動によって当初造成した2つの砂州が岸側の単一の砂州に変化した(図-39)。また、当該砂州の粒度分布は、砂州全体でほぼ一致しており、造成半年後において土質として均質化していた。そして、図-40(b)のサクシオンと空気侵入サクシオンの関係は、造成

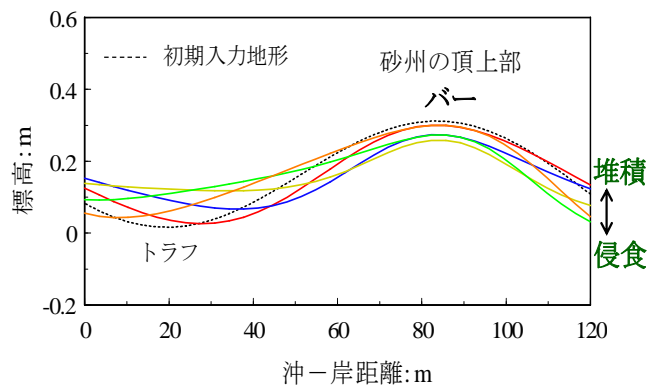
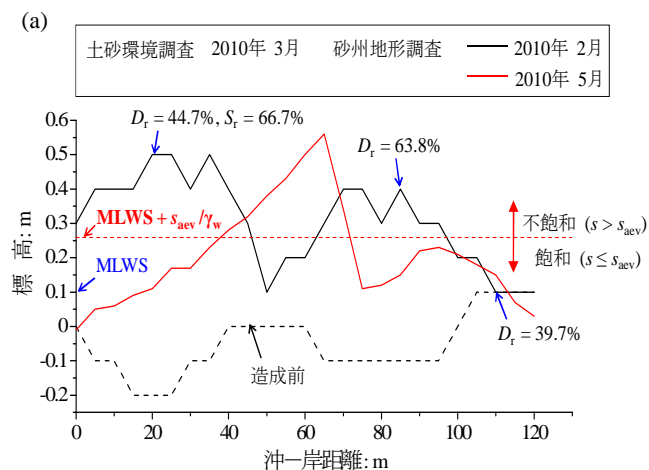


図-42 漂砂ーサクシオン動態効果の連成による造成砂州地形動態の解析結果

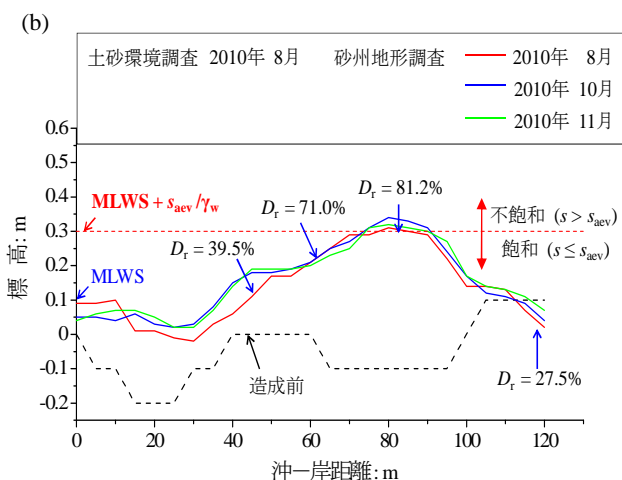


図-41 造成砂州の地形動態ー土砂環境場のリンクに関する現地調査・室内試験の統合分析結果

砂州上の全ての調査地点が飽和域であったことを意味する。実際、いずれの地点でも実測飽和度  $S_r \cong 100\%$  となっていたことを確認している。このような実質飽和の下では、土砂の間隙・硬軟および強度は、サクシオン動態の効果によって大きく変化する。すなわち、同図より、サクシオン動態の厳しさが増すにつれて、間隙比は著しく低下し、対応する相対密度も砂州の水際での  $D_r \cong 20\%$  から砂州頂上部で  $D_r = 80\%$  と実に50%以上の高いレベルで顕著に上昇したことがわかる。

(2) 地形動態ー土砂環境場の統合分析結果

代表岸沖測線 A (図-39 (b)) における造成砂州の地形動態ー土砂環境場のリンクに関する現地調査・室内試験の統合分析結果を図-41に示す。同図(a)より、干潮時にサク

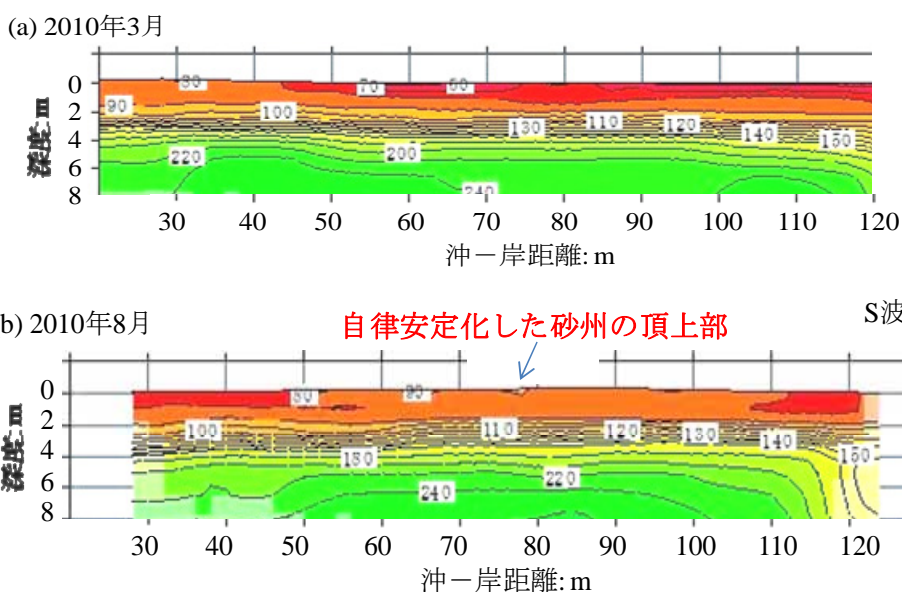


図-43 造成砂州の地盤構造変化に関する高精度表面波探査結果

底生生物の種類数

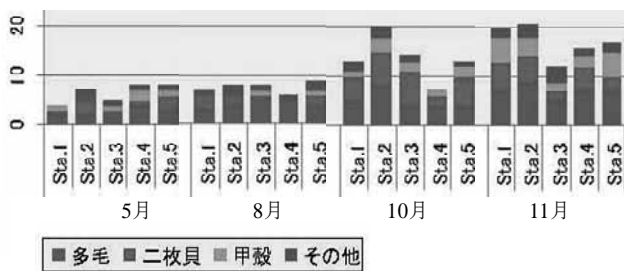


図-44 造成砂州の底生生物種の動態に関する調査結果 (Sta.1-5 は砂州地形内部の地点を表す)

クションが空気侵入サクション値を上回る不飽和領域 ( $s > s_{aev}$ ) では、サクション動態による高密度化の程度は小さいため、地盤高が高く飽和度  $S_r$  が低くなるほど土砂は緩く留り ( $D_r=44.7\%$ )、その結果、当該領域にある砂州(バー)は岸沖方向に大きく変動したことがわかる。一方、図-41 (b)より、上述の地形変動の過程で砂州の頂上部が実質飽和域に達した後は、サクション動態による高密度化が進行し ( $D_r=81.2\%$ )、表面せん断強度が顕著に(約3倍)増加した結果、地形変化が顕著に抑制されて自律安定化した。ここに、上述の3倍とは、中央粒径  $D_{50}$  が  $0.2\text{mm}$  程度の天然の細砂(干潟土砂)において相対密度  $D_r$  が  $40\%$  から  $80\%$  に上昇した際の冠水状態での表面せん断強度の増加割合 (Sassa and Watabe, 2007, 2009) を表している。実際、このような実質飽和域での漂砂—サクション動態効果の連成による造成砂州の自律安定性の発現は図-42に示す解析結果、すなわち侵食・堆積過程によってトラフは動くもののバーの位置は安定していること、ならびに図-43に示す高精度表面波探査による地盤構造変化、とりわけ自律安定化した砂州の頂上部で  $S$  波速度が顕著に増加したことににおいても明瞭に確認することができる。

そして、図-44において、造成砂州が安定化した後(10月, 11月)は、底生生物種が顕著に増加したことがみてとれる。安定したバートラフ地形の形成は、多様な地盤環境が安定的に形成されることを意味する。このことは、本報告の5章で記述した生物住環境診断チャートに基づくと、対応する多種多様な生物生息が実現しうることを表しており、上述の事実はこれらのこととよく整合している。

(3) 浅場造成高・覆砂厚の最適設計指針

以上の結果・考察に基づくと、砂州の自律安定性を発揮させるための最適な浅場造成高  $H$  および覆砂厚  $D$  を次式のかたちで得ることができる。

$$H = MLWS + \frac{S_{aev}}{\gamma_w} \tag{9}$$

$$D = H - H_{org} \tag{10}$$

ここに  $MLWS$  は大潮平均低潮面、 $H_{org}$  は造成前の地盤高である。造成高が上式(9)による地盤高を上回る場合には、大潮干潮時に地盤表層が不飽和状態となりうるため、サクション動態の効果が十分に期待できない。一方、造成高が当該地盤高の近傍に位置することは、地盤表層が潮汐作用下において常に実質飽和状態となり、かつ、前述の許容地下水位内で最大のサクション動態効果が期待できることを意味する。図-41の調査・分析結果は、本メカニズムの帰結として、上式(9)および(10)と整合するかたちで潮間帯砂州の自律安定性が発現することを実証するものである。また、本指針の有効性は、沿岸方向における地形断面の調査分析結果(図-39参照)においても同様に成り立つことを明らかにしている。

6.5 まとめ

本章では、東京湾葛西沖の浅場に造成された干潟砂州を対象とした一連の現地調査と室内試験および解析を実施し、筆者らが新たに見出したサクション動態効果と漂砂・地形変化のフィードバックによる潮間帯砂州の動的安定原理について詳しく検証した。その結果、不飽和域から実質飽和域に遷移する過程すなわちサクション動態による繰返し収縮と表面せん断強度増加が顕著に生じる過程において、砂州の自律安定性が見事に発現することを明らかにした。そして、これに基づく浅場造成高・覆砂厚の最適設計(式(9)および(10))を提示した。本指針は、地形安定と生物多様性の両立を実現しうるものである。

7. 結論

本報告では、水と地盤と生態を融合した新たな学際領域として、筆者らが先駆的に開拓・推進している生態地盤学の展開を通じて、干潟および砂浜海岸における多種多様な生物生態ならびに地形動態に果たす地盤環境の役割を体系的に解明するとともに、対応する工学基盤・指針を提示した。以下では、各章で得られた主な知見と今後の有用性についてまとめる。

2章では、干潟・砂浜に生息する異なる2つの典型的な二枚貝種を対象として、土砂環境動態に対する新たな2つの潜砂基準と潜砂適応の存在を見出すとともに、その発現

機構を解明した。そして、これらの定量的な基準が、干潟・砂浜における稚貝から成貝にかけて二枚貝の空間分布と行動・形状適応に果たす役割と重要性について明らかにした。現在および将来における海面上昇は、長期にわたり地下水水位変動の状態を変化させることから、潮間帯土砂のサクシオン動態、相対密度、および、硬さの顕著な変化をもたらす。二枚貝の土砂環境動態に対する系統的な応答特性に基づくと、本章で得られた知見は、潮間帯における現在および将来の土砂環境変化に対する二枚貝応答の基盤として有効に資することができる。

3章では、各種の生態地盤実験、モデルの構築および土砂環境／分布形成の一体調査によって、巣穴底生生物が、自らの巣穴発達のための最適・限界サクシオン場を探知する“生物センサ”を有し、地表サクシオンの空間勾配に基づいて、住活動に適した場を自ら選択して巣穴活動を行うことを世界で初めて明らかにした。そして、生物個体群（パッチ）の分布が、実験・現地調査結果の双方で、提案する最適住活動モデルによる予測と見事に整合するかたちで現れることを示した。本結果は、巣穴底生生物が、自らの住活動に適した土砂環境を選択してパッチを形成することを実証するものであり、将来の生態応答予測にも活用が期待できる。

4章では、砂浜の種類やタイプに依らず、空気進入サクシオン値を基準としたサクシオンが砂浜潮間帯の飽和・不飽和、緩密、硬さ軟らかさ等の多様な生物住環境の発現を支配していること、そして、異なる3種の小型甲殻類の生息限界域と高密度域の分布が、多様な生物住環境とともに生物住活動の最適・限界条件を支配するサクシオンによって統一的に規定しうることを初めて明らかにした。これらの知見は、従来の隘路を突破しており、砂浜海岸における水産資源の保全・管理に今後有効に資することが期待できる。

5章では、潜穴、巣穴形成、潜砂等の多様な住活動の形態や生物個体の大きさ・重さの違いに依らず、生物住活動の適合土砂環境場と限界土砂環境場の両者が生物種ごとに存在することを世界で初めて明らかにした。そして、上述の生物適合場と限界場の生物種間の複雑な相互関係を現地土砂環境に照らして浮き彫りにする生物住環境診断チャートを構築した。さらに、各地の自然・造成干潟における調査と室内試験を通じて、これまで未解明に留まっていた多種多様な干潟生物の生息分布と住み分けの実態が、同チャートときわめて良く整合していることを明らかにした。これらの結果は、“干潟は、なぜ多様な生物による複雑な生態系が維持されているのか？”という根本的な問いに対して、新たな学際領域である生態地盤学の立場から

解き明かすことに成功したと同時に、生物多様性の保全・再生に直接資する科学技術体系／新基盤を構築し、2つの干潟造成事業での検証を通じて、その有効性を包括的に実証したものである。

6章では、東京湾葛西沖の浅場に造成された干潟砂州を対象として、筆者らが新たに見出したサクシオン動態効果と漂砂・地形変化のフィードバックによる潮間帯砂州の動的安定原理について詳しく検証した。その結果、同原理に基づいて予測した安定地盤高、具体的には、不飽和域から実質飽和域に遷移する過程すなわちサクシオン動態による繰返し収縮と表面せん断強度増加が顕著に生じる過程において、砂州地形の自律安定性が見事に発現することを明らかにした。そして、これに基づく浅場造成高・覆砂厚の最適設計指針（式(9)および(10)）を提示した。本知見は、来襲する波・流れ外力に対して動的に安定することが強く望まれる生物生息基盤のバリア地形デザインに資するものである。

本研究で得られた以上の知見は、従来、困難であった多様な生物種に対応した生物住環境の評価・モニタリング・管理を実現可能とし、沿岸環境・生態系の保全・回復に大きく寄与するものである。また、併せて、本報告で提示した生物多様性と地形安定の両立を実現しうる工学指針は、今後の干潟・浅場造成事業において広く活用されることが期待される。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（B）課題番号18360232 および 20360216、挑戦的萌芽研究 22656107）を受けた。現地調査実施に際しては、国土交通省関東地方整備局、国土交通省中国地方整備局、内閣府沖縄総合事務局、熊本大学、各干潟の地元漁協関係者に御協力いただいた。徳山造成干潟の調査は、五洋建設との共同研究の一部として実施したものであり、中瀬浩太氏、岩本裕之氏および竹山佳奈氏に御協力いただいた。新潟県の砂浜海岸における調査は、水産総合研究センター日本海区水産研究所の高田宜武主幹研究員および梶原直人元主任研究員（現瀬戸内海区水産研究所主任研究員）と連携して実施したものである。また、葛西造成砂州の表面波探査の実施に際しては、応用地質株式会社の林宏一氏および橋本裕司氏の協力を得た。ここに記し、関係各位に深謝の意を表します。

## 参考文献

Alexander, R.R., Stanton, R.J. and Dodd, J.R. (1993): Influence of sediment grain size on the burrowing of bivalves: correlation with distribution and stratigraphic persistence

- of selected neogene clams. *Palaios*, **8**, 289-303.
- Amos, C.L., Wagoner, N.A.V. and Daborn, G.R. (1988) : The influence of subaerial exposure on the bulk properties of fine-grained intertidal sediment from Minas Basin, Bay of Fundy. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **27**, 1-13.
- Bear, J. (1979) : *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill Intl. Book Co., New York.
- Beukema, J.J. and Vlas, J. (1989) : Tidal-current transport of thread-drifting postlarval juveniles of the bivalve *Macoma balthica* from the Wadden Sea to the North Sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **52**, 193-200.
- Brazeiro, A. (2005) : Geomorphology induces life history changes in invertebrates of sandy beaches: the case of the mole crab *Emerita analoga* in Chile. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **85**, 113-120.
- Brown, A. C. and A. McLachlan (1990) : *Ecology of Sandy Shores*. Amsterdam: Elsevier, 328 p.
- Burnham, K.P. and Anderson, D.R. (2002) : *Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach*. Springer, New York.
- Cartwright, N., Baldock, T.E., Nielsen, P., Jeng, D.S. and Longbin, T. (2006) : Swash-aquifer interaction in the vicinity of the water table exit point on a sandy beach. *J. Geophys. Res.*, **111**, C09035, doi:10.1029/2005JC003149.
- Compton, T.J., Troost, T.A., Drent, J., Kraan, C., Bocher, P., et al. (2009) : Repeatable sediment associations of burrowing bivalves across six European tidal flat systems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **382**, 87-98.
- Cummings, V., Vopel, K. and Thrush, S. (2009) : Terrigenous deposits in coastal marine habitats: influences on sediment geochemistry and behaviour of post-settlement bivalves. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **383**, 173-185.
- Dang, C., Montaudouin, X., Gam, M., Parioissin, C. and Bru N, et al. (2010) : The Manila clam population in Arcachon Bay (SW France): Can it be kept sustainable? *J. Sea. Res.* **63**, 108-118.
- Defeo, O. and McLachlan, A. (2005) : Patterns, Processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **295**, 1-20.
- Donn, T.E. Jr and Els, S.F. (1990) : Burrowing times of *Donax serra* from the south and west coasts of South Africa. *Veliger*, **33**, 355-358.
- Dorgan, K., P. A. Jumars, B. Johnson, B.P. Boudreau and E. Landis (2005) : Burrow extension by crack propagation. *Nature*, **433**, 475.
- Dugan, J.E., Hubbard, D.M. and Lastra, M. (2000) : Burrowing abilities and swash behaviour of three crabs, *Emerita analoga* Stimpson, *Blepharipoda occidentalis* Randall and *Lepidopa californica* Efford (Anomura, Hippoidea), of exposed sandy beaches. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **255**, 229-245.
- Dugan, J.E., Jaramillo, E., Hubbard, D.M., Contreras, H. and Duarte, C. (2004) : Competitive interactions in macroinfaunal animals of exposed sandy beaches. *Oecologia*, **139**, 630-640.
- Eshky, A.A., Atkinson, R.J.A. and Taylor, A.C. (1995) : Physiological ecology of crabs from Saudi Arabian mangrove. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **126**, 83-95.
- Hoefel, F. and S. Elgar (2003) : Wave-induced sediment transport and sandbar migration, *Science*, **299**, 1885-1887.
- Houlsby, G.T. (1982) : Theoretical analysis of the fall cone test. *Géotechnique*, **32**, 111-118.
- Hsu, T.-J. and D. M. Hanes (2004) : Effects of wave shape on sheet flow sediment transport, *J. Geophys. Res.*, **109**, C05025, doi:10.1029/2003JC002075.
- Hunt, H.L. (2005) : Effects of sediment source and flow regime on clam and sediment transport. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **296**, 143-153.
- Huz, R., Lastra, M. and Lopez, J. (2002) : The influence of sediment grain size on burrowing, growth and metabolism of *Donax trunculus* L. (Bivalvia: Donacidae). *J. Sea Res.* **47**, 85-95.
- Icely, J.D. and Jones, D.A. (1978) : Factors affecting the distribution of the genus *Uca* (Crustacea: Ocypodidae) on an East African shore. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, **6**, 315-325.
- James, R. J. and P. G. Fairweather (1996) : Spatial variation of intertidal macrofauna on a sandy ocean beach in Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **43**, 81-107.
- Johnson, R.G. (1965) : Temperature variation in the infaunal environment of a sand flat. *Limnol. Oceanogr.*, **10**, 114-120.
- Karplus, I., R. Szlep and M. Tsumamal (1972) : Associate behavior of the fish *Cryptocentrus cryptocentrus* (Gobiidae) and the pistol shrimp *Alpheus djiboutensis* (Alpheidae) in artificial burrows. *Mar. Biol.*, **15**, 95-104.
- Kuwae, T., Miyoshi, E., Sassa, S. and Watabe, Y. (2010) : Foraging mode shift in varying environmental conditions by dunlin *Calidris alpina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **406**, 281-289.



- Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979) : Soil Mechanics, John Wiley & Sons.
- Longuet-Higgins, M.S. (1983) : Wave set-up, percolation and undertow in the surf zone. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, **390**, 283-291.
- Mann, R. (1988) : Distribution of bivalve larvae at a frontal system in the James River, Virginia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **50**, 29-44.
- Masselink, G., A. Kroon and R. G. D. Davidson-Arnott (2006) : Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings – A review, *Geomorphology*, **73**, 33-49.
- McGaw, I.J. (2005) : Burying behaviour of two sympatric crab species: *Cancer magister* and *Cancer productus*. *Scientia Marina*, **69**, 375-381.
- McLachlan, A. (1990) : Dissipative beaches and macroinfauna communities on exposed intertidal sands. *J. Coast. Res.*, **6**, 57-71.
- McLachlan, A., Jaramillo, E., Donn, T.E. and Wessels, F. (1993) : Sandy beach macroinfauna communities and their control by the physical environment: a geographical comparison. *J. Coast. Res.*, **15**, 27-38.
- McLachlan, A., Jaramillo, E., Defeo, O., Dugan, J., de Ruyck, A. and Coetzee, P. (1995) : Adaptations of bivalves to different beach types. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **187**, 147-160.
- Nel, R., McLachlan, A. and Winter, D.P.E. (2001) : The effect of grain size on the burrowing of two *Donax* species. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **265**, 219-238.
- Nielsen, P. (1992) : Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport. Advanced Series on Ocean Engineering, **4**, Word Scientific, 324p.
- Norkko, A., Cummings, V.J., Thrush, S.F., Hewitt, J.E. and Hume, T. (2001) : Local dispersal of juvenile bivalves: implications for sandflat ecology. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **212**, 131-144.
- Palmer, M.A. and Filoso, S. (2009) : Restoration of ecosystem services for environmental markets. *Science*, **325**, 575-576.
- Przeslawski, R., Zhu, Q. and Aller, R. (2009) : Effects of abiotic stressors on infaunal burrowing and associated sediment characteristics. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **392**, 33-42.
- Ratcliffe, P.J., Jones, N.V. and Walters, N.J. (1981) : The survival of *Macoma balthica* (L.) in mobile sediments. In: Jones, N.V. & Wolff, W.J. (eds) Feeding and survival strategies of estuarine organisms. Plenum Press, New York: 91-108.
- Ruessink, B. G., Y. Kuriyama, A. J. H. M. Reniers, J. A. Roelvink and D. J. R. Walstra (2007) : Modeling cross-shore sandbar behavior on the time scale of weeks. *J. Geophys. Res.*, **112**, F03010, doi:10.1029/2006JF000730.
- Sassa, S. and Watabe, Y. (2007) : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. *J. Geophys. Res.*, **112**, F01003, doi:10.1029/2006JF000575.
- Sassa, S. and Watabe, Y. (2008) : Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **354**, 191-199.
- Sassa, S. and Watabe, Y. (2009) : Persistent sand bars explained by geodynamic effects. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L01404, doi:10.1029/2008GL036230.
- Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T. (2011) : Burrowing criteria and burrowing mode adjustment in bivalves to varying geoenvironmental conditions in intertidal flats and beaches, *PLoS ONE*, **6**(9), e25041, doi:10.1371/journal.pone.0025041.
- Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T. (2013) : Ecological geotechnics: Role of waterfront geoenvironment as habitats in the activities of crabs, bivalves, and birds for biodiversity restoration. *Soils Found.*, **53**(2), 246-258.
- Shimoda, K. and A. Tamaki (2004) : Burrow morphology of the ghost shrimp *Nihonotrypaea petalura* (Decapoda: Thalassinidea: Callianassidae) from western Kyushu, Japan. *Marine Biology*, **144**, 723-734.
- Takahashi, K., Hirose, T. and K. Kawaguchi (1999) : 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*, **65**, 856-864.
- Tallqvist, M. (2001) : Burrowing behavior of the Baltic clam *Macoma Balthica*: effects of sediment type, hypoxia and predator presence. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **212**, 183-191.
- Tamaki, A., Nakaoka, A., Maekawa, H. and Yamada, F. (2008) : Spatial partitioning between species of the phytoplankton-feeding guild on an estuarine intertidal sand flat and its implication on habitat carrying capacity. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, **78**, 727-738.
- Thrush, S.F., Hewitt, J.E., Pridmore, R.D. and Cummings, V.J. (1996) : Adult/juvenile interactions of infaunal bivalves:

- contrasting outcomes in different habitats. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **132**, 83-92.
- Trueman, E.R., Brand, A.R. and Davis, P. (1966) : The dynamics of burrowing of some common littoral bivalves. *J. Exp. Biol.*, **44**, 469-492.
- Uchiyama, Y. (2007) : Hydrodynamics and associated morphological variations on an estuarine intertidal sand-flat. *J. Coast. Res.*, **23**(4), 1015-1027.
- Vincenzi, S., Caramori, G., Rossi, R. and Leo, G. (2006) : A GIS-based habitat suitability model for commercial yield estimation of *Tapes philippinarum* in a Mediterranean coastal lagoon (Sacca di Goro, Italy). *Ecol. Model.*, **193**, 90-104.
- Wada, K. (2000) : Ecological Sciences 11, Kyoto University (in Japanese).
- Watabe, Y. and Sassa, S. (2008) : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation. *Mar. Geol.*, **252**, 79-88.
- Watabe, Y. and Sassa, S. (2012) : Sedimentary stratigraphy of natural intertidal flats with various characteristics. *Soils Found.*, **52**(3), 411-429.
- Yamada, F. and N. Kobayashi (2007) : Intertidal multiple sand bars in a low-energy environment. *J. Waterw., Port, Coast. Ocean Eng.*, **133**(5), 343-351.
- Yokoyama, H., Tamaki, A., Koyama, K., Ishii, Y. and Shimoda, K. et al. (2005) : Isotopic evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake Sound, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **304**, 101-116.
- Young, E.F., Bigg, G.R. and Grant, A. (1996) : A statistical study of environmental influence on bivalve recruitment in the Wash, England. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **143**, 121-129.
- Zwarts, L. and Wanink, J. (1989) : Siphon size and burying depth in deposit- and suspension-feeding benthic bivalves. *Mar. Biol.*, **100**, 227-240.
- 巖佐庸, 松本忠夫, 菊池喜八郎 編 (2003) : 生態学事典. 共立出版, 日本生態学会, 682p.
- 大串隆之, 近藤倫生, 野田隆史 (2008) : メタ群集と空間スケール. シリーズ群集生態学 **5**, 185p.
- 柿野純, 中田喜三郎, 西沢正, 田口浩一 (1991) : 東京湾盤州干潟におけるアサリの生息と波浪の関係, 水産工学, **28**, 51-55.
- 梶原直人, 高田宜武 (2008) : 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, **45**, 151-156.
- 桑江朝比呂, 三好英一 (2012) : 鳥類の食性の探求による干潟生態系の保全と再生. 港湾空港技術研究所報告, **51**(3), 3-75.
- 越川義功, 田中昌宏 (2006) : アサリ初期稚貝の生息環境に与える地形変動の影響評価, 海岸工学論文集, **53**, 1211-1215.
- 国土交通省港湾局 (2003) : 海の自然再生ハンドブック. 第2巻, 干潟編, 138p.
- 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 (2006) : 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~.
- COP10 (2010) : 生物多様性条約第10回締結国会議 (COP10).
- 櫻井泉, 瀬戸雅文 (1996) : ウバガイ, バカガイおよびアサリの潜砂行動に及ぼす水温, 塩分および底質粒径の影響, 日本水産学会誌, **62**, 878-885.
- 佐々真志, 渡部要一 (2005) : 砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割. 海岸工学論文集, **52**, 981-985.
- 佐々真志, 渡部要一 (2006a) : 干潟底生生物の住活動における臨界現象と適合土砂環境場の解明. 海岸工学論文集, **53**, 1061-1065.
- 佐々真志, 渡部要一 (2006b) : 砂質干潟の生態土砂環境場に果たすサクシオンの役割—巣穴住活動/保水場の性能評価・設計指針—. 港湾空港技術研究所報告, **45**(4), 61-107.
- 佐々真志, 渡部要一 (2007) : アサリの潜砂限界強度について. 海岸工学論文集, **54**, 1196-1200.
- 佐々真志, 渡部要一, 石井嘉一 (2007) : 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, **54**, 1151-1155.
- 佐々真志, 渡部要一, 桑江朝比呂 (2008) : 鳥と地盤と底生生物の関係に果たす水際土砂環境の役割. 海岸工学論文集, **55**, 1171-1175.
- 佐々真志, 渡部要一, 梁順普 (2009a) : 生態地盤学の展開によるアサリの潜砂性能の系統的解明. 土木学会論文集, **B2-65**(1), 1116-1120.
- 佐々真志, 渡部要一, 梁順普 (2009b) : 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. 土木学会論文集, **B2-65**(1), 1226-1230.
- 佐々真志 (2010) : 生態地盤学: 干潟・砂浜海岸の生態系・地形動態に果たす土砂物理環境の役割. 第9回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム, 特別講演冊子, 1-52.

- 佐々真志, 梁順普, 渡部要一, 梶原直人, 高田宜武 (2010a):  
 砂浜海岸における水産有用魚類の餌資源生物分布に  
 果たすサクシヨンの役割. 土木学会論文集 **B2-66(1)**,  
 1126-1130.
- 佐々真志, 渡部要一, 梁順普 (2010b): 巣穴底生生物の最  
 適住活動モデルによる土砂環境選択行動とパッチ形  
 成の実証. 土木学会論文集 **B2-66(1)**, 1096-1100.
- 佐々真志, 渡部要一, 梁 順普, 白井一洋 (2011): 漂砂ー  
 サクシオン動態効果の連成による生物生息砂州の自  
 律安定と浅場造成高の最適設計. 土木学会論文集  
**B2-67(2)**, 1131-1135.
- 首藤宏幸 (2002): 宮古湾葉の木浜に放流したホシガレイ  
 種苗の摂餌生態, 日本栽培漁業協会, p. 49.
- 古川恵太, 藤野智亮, 三好英一, 桑江朝比呂, 野村宗弘,  
 萩本幸将, 細川恭史 (2000): 干潟の地形変化に関す  
 る現地観測ー盤洲干潟と西浦造成干潟ー. 港湾技研資  
 料, **965**, 1-30.
- 梁 順普, 佐々真志, 渡部要一, 岩本裕之, 中瀬浩太  
 (2011): 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  
**B2-67(2)**, 986-990.
- 渡部要一, 佐々真志, 河野研二 (2007): 岸沖・沿岸両方向  
 に発達した干潟多段バー・トラフの堆積構造とその形  
 成要因, 海岸工学論文集, **54**, 1166-1170.
- 渡部要一, 佐々真志, 桑江朝比呂, 梁順普, 田中政典  
 (2010): 多チャンネル型表面波探査に基づいた干潟土  
 砂堆積構造の評価ーせん断波速度構造の考察と人工  
 干潟安全管理手法の提案ー. 港湾空港技術研究所報告,  
**49(3)**, 157-196.

記号表

- a,b,c 二枚貝の潜砂指標,  
 a: 鉛直完全潜砂 ( $z^* = -1, \theta = 90 \pm 10^\circ$ ),  
 b: 傾斜・部分潜砂 ( $0 < \theta < 80^\circ$  又は  $-1 < z^* < 0$ ),  
 c: 潜砂不可 ( $z^* = 0, \theta = 0$ ).
- $a^*$  サクシオン動態効果を考慮した漂砂モデルの土砂  
 上のせん断応力によって規定されるパラメタ
- $A$  漂砂ポテンシャルを表す係数
- CR 生物住活動の限界土砂環境場
- $D$  砂州の自律安定性を発揮させるための最適な覆砂厚
- $D_{10}$  土砂の有効径
- $D_{50}$  土砂の中央粒径
- $D_r$  土砂の相対密度 ( $(e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$ )
- $e$  土砂の間隙比

- $e_{\max}$  土砂の最大間隙比
- $e_{\min}$  土砂の最小間隙比
- $E, E_c$  二枚貝の潜砂エネルギー, 潜砂エネルギー容量
- GAM 統計解析の一般化加法モデル
- GLM 統計解析の一般化線形モデル
- $G_s$  土粒子の比重
- G.W.L. 地表位置を基準とした地下水位
- $H$  砂州の自律安定性を発揮させるための最適な浅場  
 造成高
- $H_{org}$  造成前の地盤高
- $L$  二枚貝の殻長
- $L^*$   $Q$  の岸沖変化の波長
- MHWS 大潮平均高潮位
- MLWN 小潮平均低潮位.
- MLWS 大潮平均低潮位
- $n$  土砂の間隙率  $e / (1+e)$
- $n$  生物個体数
- OP 生物住活動の適合土砂環境場
- OP<sup>A</sup> 地下水位上 (Above G.W.L.) の巣穴住活動における  
 最適状態
- OP<sup>B</sup> 地下水位下 (Below G.W.L.) の巣穴住活動における  
 最適状態
- $p$  有意確率
- $Q$  岸沖方向の局所漂砂量
- $r$  相関係数
- $s$  サクシオン  $u_a - u_w$
- $s_{aev}$  空気侵入サクシオン
- $S_r$  土砂の飽和度
- $t$  時間
- $T$   $Q$  の時間変動の周期
- $u_a$  大気圧
- $u_w$  土砂の間隙水圧
- $w$  土砂の含水比
- W.L. 水位
- $x$  岸沖方向の水平距離
- $z$  地盤高
- $z_0$  二枚貝の地表上の露出高
- $z^*$  二枚貝の正規化潜砂深さ  $z_0/L-1$
- $\rho$  水密度
- $\rho_s$  土粒子密度
- $\gamma_w$  水の単位体積重量
- $\theta$  二枚貝の潜砂角度

- $\psi$  空気侵入サクシヨン式(5)の係数值  $20\text{mm}^2$
- $\phi$  土砂の内部摩擦角
- $\tau$  波・流れによるせん断応力
- $\tau^*$  土砂のベーンせん断強度
- $\tau_v^*$   $\tau^* < \tau_v^*$ の条件下で二枚貝の鉛直完全潜砂が  
可能な潜砂基準
- $\tau_f^*$   $\tau^* > \tau_f^*$ の条件下で二枚貝の潜砂が不可となる  
潜砂基準

港湾空港技術研究所報告 第52巻第4号

2013.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人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/>

印刷所 株式会社ワコー

Copyright © (2013) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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. Role of Geoenvironment in the Benthic Ecology and Morphodynamics of Intertidal Flats and Beaches -Ecohabitat Chart and Optimal Design of Dynamically Stable Sandbars- .....Shinji SASSA, Yoichi WATABE, Soonbo YANG, Tomohiro KUWAE .....	3
2. The effect of compaction grouting as a countermeasure against liquefaction .....Daiki TAKANO, Satoshi NISHIMURA, Yoshiyuki MORIKAWA, Hidenori TAKAHASHI .....	45
3. Rheological Behavior of W/O Emulsion of Water-Heavy Oil System and Friction Loss Reduction Methods for its Flow in a Pipe ..... Isamu FUJITA, Yoshitaka MATSUZAKI .....	75