

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

佐々真志¹・渡部要一²

本研究は、砂質干潟における生態土砂環境場の評価・設計法の開発を目標として、底生生物の住活動と土砂物理環境の関わりを解明することを目的としている。具体的には、盤洲干潟における代表的な巣穴底生生物であるコメツキガニを対象として、現地動態観測により、巣穴住活動が地下水位・サクシンの動態と密接にリンクしていることを明らかにした。干潟表層土砂の硬軟や強度の形成に重要な役割を担うサクシンと相対密度を制御した一連の室内生物実験により、巣穴住活動の性能を支配する臨界・最適・限界土砂環境場の存在を見出した。得られた知見を活用して、良好な住活動を満足しうる生態土砂環境場の設計指針を提示した。

1. はじめに

干潟生態系の維持・修復・創造は、河口・沿岸域の環境保全／再生を実現する上で重要不可欠な課題であり、底生生物に関連して、生態学、海岸工学、水質化学等の分野から国内外においてこれまでに数多くの研究がなされてきている (Robertson and Newell, 1982; Zimmer, 1987; 加藤ら, 1999; 林ら, 2002; Koretsky ら, 2005)。その研究対象は、主に底生生物の水質浄化機能に果たす役割から、バクテリアや有機物等の摂餌すなわち食活動に集中している。一方、底生生物の住活動に関する研究は少なく、巣穴の形状や分布に留まっている (Litulo, 2005)。筆者らは、干潟生態系の再生には、食活動に加えて良好な住活動を満足しうる土砂環境場を実現することが肝要であり、特に、表層土砂の間隙状態や硬軟および強度の形成に対して重要な貢献を成すサクシン (佐々・渡部, 2005) が、住活動の“性能”と密接にリンクしていると考えている。

本研究では、上述を背景として、砂質干潟における典型的な巣穴底生生物であるコメツキガニ (Maitland, 1986) を取り挙げて、a) 住活動形態と土砂環境動態の関わりを現地観測により調べることで、b) 一連の室内生物実験により巣穴住活動に適合した土砂環境場を明らかにすること、c) 得られた知見を活用して生態土砂環境場の設計指針を提示することの3つを目的としている。

2. 自然砂質干潟における巣穴住活動・土砂環境動態の一体連続観測

干潟の底生生物は、その種類に応じて岸沖方向の土砂内部に住み分けており、一般的に干出時においてその活

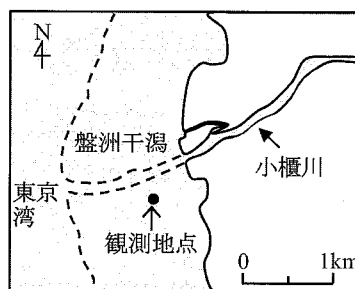


図-1 盤洲干潟における現地観測地点の模式図

動を活発化する。本研究では、盤洲砂質干潟における岸沖中央部付近の地点 (図-1) において、大潮の干出時にコメツキガニの住活動形態とサクシン・地下水位動態の一体連続観測を実施した。現地の土質は、岸沖方向においてほぼ均質で、細粒分を数%含有する平均粒径0.18~0.22 mmの砂質土である (図-2)。同観測に際しては、住活動の指標として、巣穴修復活動に伴って生じる砂団子群の単位領域 (3 m × 3 m) 当りの生成数に着目した。

得られた観測結果を図-3に示す。巣穴の修復活動が地下水位・サクシンの動態とよく連動している様子がみとれる。特に注目すべきことは、干出後の砂団子生成・排出による巣穴修復開始の時点が、干潟土砂表層に

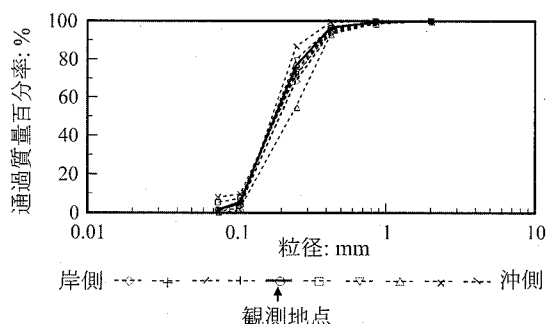


図-2 岸沖干潟における表層土砂 ($z \geq -0.3\text{m}$) の粒度分布

1 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室 研究官
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部土質研究室 長

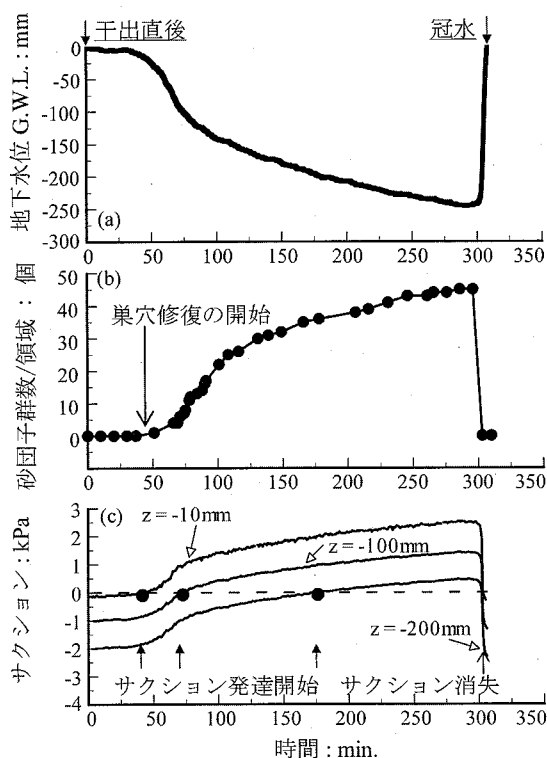


図-3 巣穴住活動形態と土砂環境動態の一体観測結果

においてサクシヨンが発達し始める時点と一致することである。そして、冠水しサクシヨンが消失すると直ちに砂団子は溶失する。以上の観測事実は、当該生物がサクシヨンの生み出す粘着力を活用して、巣穴住活動を行っていることを強く示唆するものである。

3. 干潟表層土砂のキャリブレーション実験

盤状砂質干潟における上述の現地観測結果を受けて、任意の相対密度に対するサクシヨンによる干潟土砂強度の変化特性を調べるために、コメツキガニによる住活動時の回転せん断モードを参考に、現地表層土砂を用いた一連のベーンせん断実験を実施した。この際得られるベーンせん断強度は、干潟土砂の硬軟の指標でもある。本実験には、水槽中に設置した2種類の多孔質底板付きの透明円筒アクリル容器(図-4)を使用した。模型地盤は、沈降高さを一定に保持した水中落下法と鉛直棒による均等突き固めにより、その相対密度を35.6~99.7%の5段階に制御した。地表レベルにおけるサクシヨンを、地下水位を変化させることにより-0.5~3kPaの10段階に設定した。各相対密度地盤に対して、所定の地表サクシヨンを実現した状態で、表層土砂($z=0\sim40\text{mm}$)のベーンせん断強度を計測した。本実験の結果を図-5

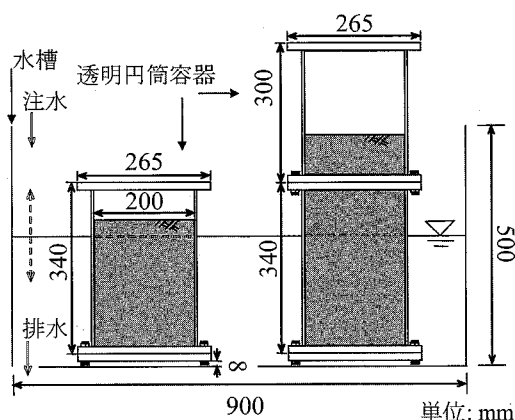


図-4 干潟地盤および生物実験に用いた透明円筒アクリル容器

に示す。まず、サクシヨンが消失する冠水時の干潟土砂強度は、相対密度のみに依存することがわかる。これとは対照的に、干出時の干潟土砂強度は、地下水位低下に伴うサクシヨンの上昇とともに、著しく増加している。このことは、日々の干出時間中において、地下水位変化に伴うサクシヨン変動によって、干潟表層の土砂強度が動的に大きく変化することを意味している。さらに、このようなサクシヨンによる表層強度変化は、強い相対密度依存性を示す。これらの実験事実は、底生生物の活動が活発化する干出時の干潟土砂強度が、サクシヨンと相対密度の双方に大きく依存することを如実に示すものである。結局、干潟土砂のベーンせん断強度 VSS は、地表サクシヨン s と相対密度 D_r の関数 $VSS = (s, D_r)$ のかたちとなる。

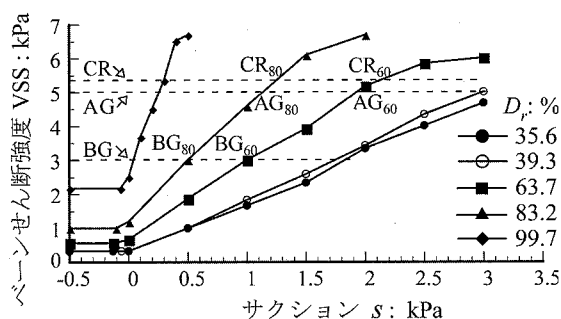


図-5 干潟表層土砂のキャリブレーション実験結果

4. サクシヨン・相対密度を制御した巣穴住活動実験

3章の地盤実験結果を踏まえて、現地より採取した土砂とコメツキガニを用いて、上述と同様にサクシヨンと相対密度を制御した一連の巣穴住活動実験を実施した。

表-1 巣穴住活動に関する実験プログラム

Series 1

Case No.	水位 : mm	サクシオン : kPa	相対密度 : %	気温 : °C	水温 : °C	塩分濃度 : %	個体重量 : g
60A	20	-0.2	63.4	25.1	21.1	2.85	0.77~1.09
80A	20	-0.2	82.0	25.7	21.6	2.74	0.75~1.06
100A	20	-0.2	98.9	25.7	22.1	2.72	0.79~1.01
60B	0	0	63.2	25.9	23.2	2.70	0.76~1.06
80B	0	0	81.8	25.9	22.4	2.79	0.77~1.08

Series 2

Case No.	地下水位 : mm	サクシオン : kPa	相対密度 : %	気温 : °C	水温 : °C	塩分濃度 : %	個体重量 : g
60C	-10	0.1	63.4	25.5	21.8	2.74	0.79~0.99
60D1	-20	0.2	63.9	25.2	20.9	2.74	0.72~1.01
60D2			65.6	25.4	21.7	2.68	0.77~1.07
60E	-500	0.5	64.8	25.9	21.3	2.70	0.73~1.07
60G1	-100	1.0	63.1	25.0	22.1	2.70	0.71~0.93
60G2			64.5	25.8	21.6	2.67	0.76~1.13
60I1	-150	1.5	65.8	25.1	22.1	2.78	0.74~1.08
60I2			61.6	25.7	22.6	2.72	0.77~1.07
60J1	-200	2.0	65.5	25.5	21.7	2.87	0.74~0.91
60J2			63.8	25.1	21.5	2.81	0.78~1.11
60K	-210	2.1	65.0	25.6	21.0	2.80	0.69~1.00
60L	-250	2.5	64.3	25.1	22.1	2.79	0.76~1.12
60M1			64.3	25.7	21.8	2.72	0.72~1.07
60M2			64.2	25.1	22.2	2.62	0.78~1.10
60N	-400	3.9	65.3	25.9	22.8	2.79	0.72~1.11

以下では、具体的な実験方法と内容および得られた代表的な実験結果について述べる。

(1) 実験方法と内容

1 ケースあたり甲羅幅 10 mm のオスのコメツギガニ 10 匹を用いて、3 シリーズ計 33 ケースの生物実験を行った (表-1)。すなわち、冠水条件で相対密度を変化させた Series 1, サクシオンを変化させて、相対密度を 62~66 % および 80~84 % に固定した Series 2 と Series 3 である。全実験シリーズを通して、気温 25 °C, 水温 21~23 °C, 塩分濃度 2.6~2.8 % に統一している。本実験に際しては、図-6(a) に示すように円筒地盤表面にカニ 1 個体ずつ円周上に①~⑩の順に放ち、地盤上面から砂団子および巣穴の生成を確認し、透明な側面から巣穴

●全シリーズにおける共通条件

底生生物の種類	性別	実験各の個体数 : 匹	甲羅幅 : mm	個体各の実験時間 : min.
コメツギガニ	オス	10	10 ± 0.5	360

Series 3

Case No.	地下水位 : mm	サクシオン : kPa	相対密度 : %	気温 : °C	水温 : °C	塩分濃度 : %	個体重量 : g
80D1	-20	0.2	81.8	25.9	20.7	2.79	0.77~1.07
80D2			82.8	25.3	22.3	2.75	0.78~1.05
80E	-50	0.5	82.0	25.4	21.4	2.72	0.80~1.08
80F1	-80	0.8	81.4	25.7	21.8	2.80	0.79~1.01
80F2			81.8	25.8	22.5	2.82	0.80~1.00
80G1	-100	1.0	80.4	26.0	22.1	2.74	0.77~1.09
80G2			81.7	25.3	22.2	2.78	0.78~1.03
80H	-120	1.2	82.3	25.3	21.7	2.72	0.78~1.00
80I1	-150	1.5	83.7	25.6	21.2	2.80	0.78~1.09
80I2			83.5	25.4	21.5	2.77	0.78~0.99
80J	-200	2.0	82.4	25.4	22.0	2.77	0.75~1.09
80L	-250	2.5	82.4	25.4	22.8	2.75	0.75~1.10
80N	-400	3.9	82.6	25.0	21.2	2.85	0.77~1.01

深度の時間発達過程を 6 時間にわたり詳しく観察した。図-6(b) は、カニ 10 個体を投入し一定時間後の典型的な様子を示している。図-7 は、観察された巣穴性状のタイプと各々に対応して同定した巣穴深度面の模式図である。計測した巣穴深度の時間発達過程の例を図-8 に示す。巣穴深さが時間とともに発達し、ある時間 T が経過後、最終深さ D に到達しているようすがわかる。当該ケースでは、生物個体 10 匹中 5 匹について最終的な巣穴到達深さまで追跡することが可能であった。各実験においては、上述のように最終深さまで追跡可能な個体ごとについて、巣穴掘削速度 D/T, 巣穴形成時間 T および巣穴到達深さ D を調べた。各実験終了後に、地盤表面から砂団子約 100 個をランダムに抽出し、その長さ a と短径 b を計測した (図-6(b) 参照)。

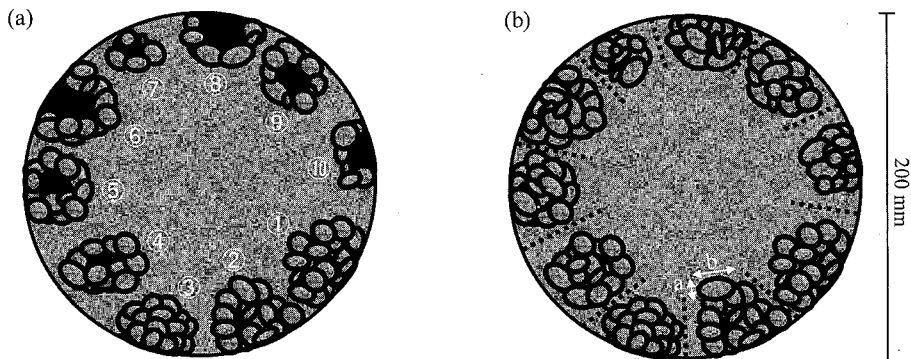


図-6 巣穴住活動に関する実験状況の平面図 : (a) 生物10個体投入直後, (b) 一定時間経過後

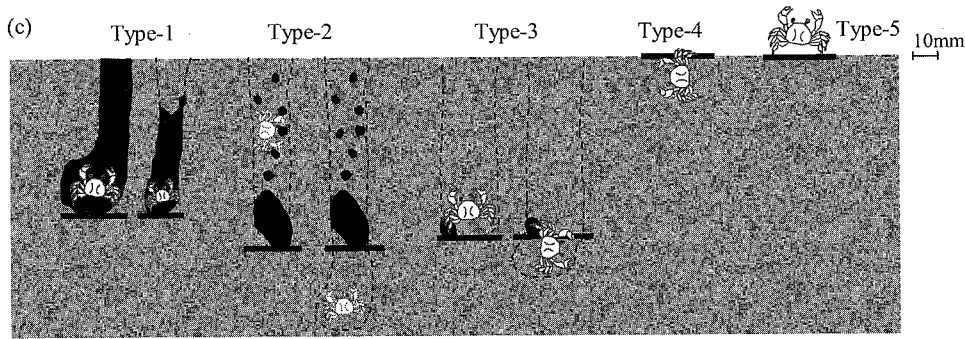


図-7 巣穴住活動に関する実験状況の側面図

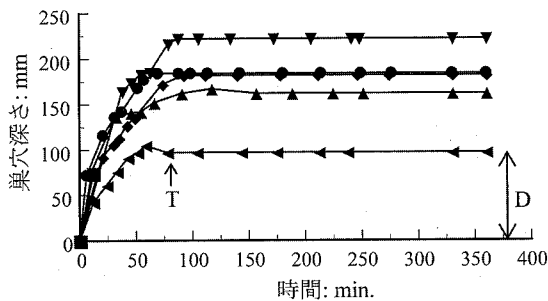


図-8 巣穴深さの時間発達過程の計測結果 (Case No. 60E)

(2) 代表的な実験結果

相対密度 60 % と 80 % の下で異なる地表サクシオン s に対して得られた砂団子径、掘削速度および巣穴形成時間を図-9 に示す。本図には、各実験ケースにおいて個体各に計測した砂団子径、巣穴掘削速度と巣穴形成時間の平均値をプロットしている。本実験結果から、砂団子径、巣穴掘削速度とも、サクシオンおよび相対密度と明瞭な相関がみられる。すなわち、サクシオン不在の下では、砂団子は生成されず巣穴を掘削することができない。サクシオン発生により、砂団子が生成され巣穴掘削が可能となる。このことは、巣穴掘削活動が、サクシオンの発生により実現される臨界現象であることを明示している。そして、サクシオン値の上昇とともに、又、相対密度が大きくなるほど、砂団子径は小さく、巣穴掘削速度は遅くなっていく。一方、巣穴形成時間については、サクシオン・相対密度に依らず、ほぼ3時間以内である。

相対密度 60 % と 80 % の下で地表サクシオン s の違いにより生じた平均巣穴到達深さの変化を図-10 に示す。本実験結果からも、巣穴の形成にはサクシオンの存在が必要不可欠であることがわかる。そして、 $D_r=60, 80$ % の双方とも、地表サクシオンの上昇に伴って、地下水面下と地下水面上における2つの最適住活動深さ (BG と AG) が発現し、その後限界住活動深さ CR に至っている。注目すべきことは、このような巣穴住活動の性能

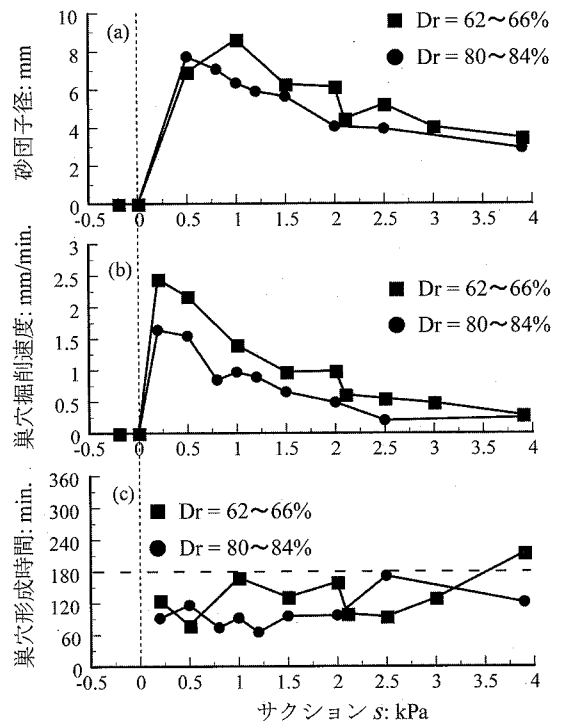


図-9 巣穴住活動実験結果：砂団子径、掘削速度、形成時間

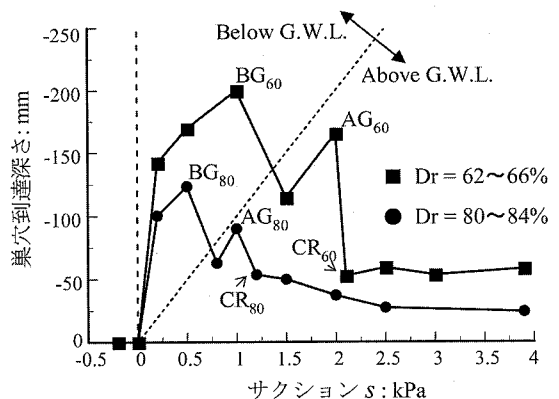


図-10 巣穴住活動実験結果：巣穴到達深さ

が、図-5に示したようなサクシオン・相対密度によって決まる固有の土砂強度に忠実に従って発揮されていることである。

5. 巢穴住活動／土砂環境場のリンクモデルと設計指針

本研究では、上述の現地観測および室内実験結果に基づいて、巢穴住活動と土砂環境場のリンクに関する概念モデルを構築している（図-11）。その要点は次の通りである。a）巢穴底生生物は、地下水位を境にして地下水面上と地下水面下の2つの特徴的な住活動領域を有する。b）地下水面上における住活動では、サクシオンの生み出す粘着力により掘削可能領域を与える役割と硬さ／強さを与える役割がトレードオフの関係を有する結果、地下水面上において最適住活動を実現するピーク状態AGと限界住活動状態CRが現れる。c）巢穴が地下水面に達した後は、サクシオン不在の下で相対密度のみに依存する強度に対応した巢穴深さが付加される。結果として、地下水面下における最適住活動状態BGが発現する。d）上述の巢穴住活動を特徴づける3つの状態CR, AG, BGは、相対密度の違いにかかわらず発現し、各状態に固有の一定強度を保持するように巢穴深さ～サクシオン関係が規定される。

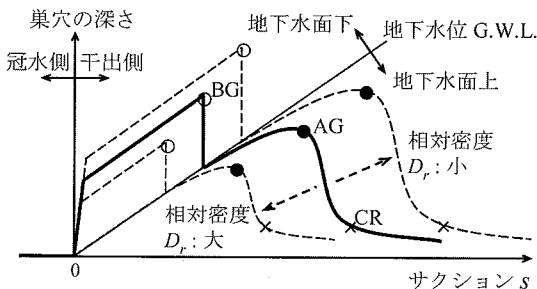


図-11 巢穴住活動／土砂環境場のリンクに関する概念モデル

本モデルを活用することにより、良好な住活動に適した土砂環境場の設計指針を得ることができる。具体的には、まず、各性能BG, AG, CRを実現する土砂強度VSSを用いて、目標とする相対密度 D_r の下で、 $VSS = (s(D_r))$ の関係式により、対応する地表サクシオン値 $s(D_r)$ を同定する。そして、自然砂質干潟における土砂保水特性を活用する。すなわち、保水性に富む干潟表層土砂では、干出時においてサクシオンは地下水位と一対一の関係を有する（佐々・渡部, 2005）。これを考慮すると、良好な巢穴住活動を可能とする為には、干出時地下水位G.W.L.の許容低下幅を $s(D_r)/\gamma_w$ により設計すればよい。ここに、 γ_w は海水の単位体積重量である。この際、図-11を参照して、BG, AG及びCRの

各状態に対応するサクシオン s の間には、 $s_{BG} < s_{AG} < s_{CR}$ 、同様に対応する地下水位G.W.L.の間には、 $G.W.L._{CR} < G.W.L._{AG} < G.W.L._{BG} < 0$ の関係が成立する。

6. ま と め

砂質干潟における生態土砂環境場の性能設計に資することを目的として、巢穴底生生物の住活動と土砂環境場の関わりに着目して、現地動態観測と一連の室内地盤および生物実験を実施した。得られた主要な知見は次のとおりである。

(1) 巢穴底生生物の住活動形態が、地下水位・サクシオンの動態と密接に連動していることを明らかにした。とりわけ、地表サクシオンの発生が、巢穴住活動における臨界現象を引き起こすことを明示した。

(2) 干潟表層土砂の相対密度に対応して、サクシオンによって誘起される土砂環境場（粘着力と硬さ）が、巢穴住活動における適合場すなわち臨界・最適・限界状態の発現を支配していることを明らかにした。このことは、巢穴住活動の性能がサクシオンの発達性状と相対密度によって規定されることを意味している。

(3) 巢穴住活動／土砂環境場のリンクモデルを構築し、良好な住活動を満足するような生態土砂環境場の設計指針を示した。本研究で得られた知見は、原理的に、多種多様な巢穴底生生物に適用可能であり、今後の更なる展開が期待できる。

参 考 文 献

- 加藤史訓・佐藤慎司・三輪竜一（1999）：海岸域の底生生物とその生息環境に関する全国的調査，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1136-1140.
- 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，第52巻，pp. 981-985.
- 林文慶・高山百合子・田中昌宏・上野成三・新保裕美・織田幸伸・池谷毅・勝井秀博（2002）：沿岸域における複数生物の生息地環境評価－生態系連続性の配慮にむけて－，水工学論文集，第46巻，pp. 1193-1198.
- Koretsky, C. M., P. V. Cappellen, T. J. DiChristina, J. E. Kostka, K. L. Lowe, C. M. Moore, A. N. Roychoudhury and E. Viollier (2005): Salt marsh pore water geochemistry does not correlate with microbial community structure, Estuar. Coast. Shelf Sci., Vol 62, pp. 233-251.
- Litulo, C. (2005): Population biology of the fiddler crab *Uca annulipes* (Brachyura: Ocypodidae) in a tropical East African mangrove (Mozambique), Estuar. Coast. Shelf Sci., Vol 62, pp. 283-290.
- Maitland, D. P. (1986): Crabs that breathe air with their legs – Scopimera and Dotilla. Nature, 319, pp. 493-495.
- Robertson, J. R. and S. Y. Newell (1982): A study of particle ingestion by three fiddler crab species foraging on sandy sediments. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 65(1), pp. 19-28.
- Zimmer-Faust, R. K. (1987): Substrate selection and use by a deposit-feeding crab. Ecology, 68(4), pp. 955-970.