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

梁 順普¹・佐々 真志²・渡辺 啓太³・高田 宜武⁴

¹(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: yan-s2@ipc.pari.go.jp

²正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長

E-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

³(国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ研究員

⁴(国研) 水産研究・教育機構 日本海区水産研究所
(〒951-8121 新潟市中央区水道町 1 丁目 5939-22)

本論文では、日本海沿岸の砂浜の保全・再生上、重要となる典型的な3種の小型甲殻類を対象として、砂浜の底生生物生態に果たす地盤環境の本質的役割に関する近年の研究結果を、室内試験による検証と合わせてまとめて提示・分析すると共に、高波イベントに伴う生物生息分布の変化と常時およびイベント過程を通じた各種生物の地盤環境適合場の一般性について明らかにした。これらの知見は、砂浜の水産資源等の保全・管理に有効に活用することが期待できる。

Key Words : *geoenvironmental dynamics, sandy beach, species distributions, suction, waves*

1. はじめに

砂浜に生息する各種の小型甲殻類は、海浜を美しく保つとともに、鳥類・魚類の餌資源生物として重要な役割を担っている。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・粒径といった3つの主因¹⁾²⁾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広く支持されている¹⁾⁹⁾。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10年来、波の遡上や潮汐作用下の地下水位変動に伴う土砂内部のサクシジョンの動態が、生物住環境を形成する上で本質的な役割を担っており、干潟・砂浜の土砂の間隙、剛性、硬さ等の生物住環境の顕著な時間的空間的变化(ベーンせん断強度にして20～50倍)を引き起こしていることが明らかとなっている^{10), 11)}。このようなサクシジョン動態による土砂収縮とせん断強度増加は、地形動態¹²⁾や堆積構造の形成¹³⁾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がわかってきている^{11), 14), 15)}。

上述の新たな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ベントスの生息分布の規定要因・指標に関して、砂浜内部の水分張力を表すサクシジョンが、各種の小型甲殻類の分布域を制御していることが明らかとなっている^{16), 17)}。

一方、日本海沿岸では高波イベントにより砂浜の顕著な動態が生じるが、その生物分布への影響については課題となっている。本論文では、このような砂浜ベントスの生息分布に果たす地盤環境の役割について、筆者らの近年の研究結果を取り纏めて提示し分析するとともに、高波イベントに伴う砂浜生物分布の変化と各種生物の地盤環境適合場の一般性について記述・考察することを目的としている。以下では、先ず、砂浜の地盤環境動態とその生物分布に果たす役割・制御機構について示した後、高波イベントに伴う調査分析結果を示し、最後に結論を述べる。

2. 砂浜生物分布に果たす地盤環境動態の役割

本節では、砂浜の地盤環境動態とサクシジョンの果たす役割について述べる。異なる3つの海浜(四ツ郷屋, 太郎

図-1 砂浜土砂環境変化に果たすサクシヨンの役割

代, 太夫浜) における土砂の飽和度, 相対密度, 及び, ベーレンせん断強度とサクシヨン s の関係¹⁰⁾を図-1に示す. この際, 各海浜の粒度は, 四ツ郷屋 ($D_{50}=0.176-0.209\text{mm}$), 太郎代 ($D_{50}=0.221-0.30\text{mm}$), 太夫浜 ($D_{50}=0.325-0.368\text{mm}$) となっている. 飽和・不飽和を分ける空気侵入サクシヨン s_{aev} 値は, 粒径が粗くなるにつれて, 四ツ郷屋, 太郎代, 太夫浜の順に小さくなっている. そして, 全海浜を通じて, $s \leq s_{aev}$ の実質飽和域 ($S_r \approx 100\%$) 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¹⁰⁾とそれに伴う土砂の高密度化ならびにせん断強度の上昇によって, 相対密度, ベーレンせん断強度ともに顕著に増加していることがわかる. 一方, $s > s_{aev}$

図-2 砂浜の3種の小型甲殻類分布とサクシヨンの関係

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とともに, サクシヨン動態による繰返し収縮効果が弱くなるため, 相対密度, ベーレンせん断強度ともに著しく低下する. 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わかる. 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.

上述の3海浜における3種の小型甲殻類分布とサクシヨンの関係¹⁷⁾を図-2に示す. 各種生物の分布限界が, ヒゲナガハマトビムシでは, サクシヨン3kPaと10kPa, ナミ

ノリソコエビでは、サクシヨン2kPa、ヒメスナホリムシでは、サクシヨン5kPaとなっていることがわかる。

このような砂浜生物分布のサクシヨンによる制御機構が、室内実験による検証¹⁷⁾を通じて明らかとなっている。具体的には、気温・水温・塩分などの大気・水環境を同一に保った状態で、各生物の分布限界近傍のサクシヨン場とそれに伴う土砂密度・硬さ変化を室内で実現し、サクシヨン変化に対する生物応答を評価した。その結果を以下に記す。ヒメスナホリムシは、サクシヨン4kPaでは20個体全部が生存していたのに対し、サクシヨン6kPaでは全個体が死亡した。ヒゲナガハマトビムシは、サクシヨン2kPaでは20個体全部が地表面に留まったが、サクシヨン4kPaでは全個体が土砂内部に潜砂した。又、同生物は、サクシヨン9kPaでは20個体全部が巣穴を形成したのに対し、サクシヨン11kPaでは巣穴は全く形成されなかった。

これらの実験結果から、各種生物のサクシヨンによる異なる3つの分布制御機構が得られる¹⁷⁾。すなわち、ヒゲナガハマトビムシの潮上帯の分布限界のサクシヨン10kPaでは、サクシヨ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。ヒメスナホリムシは、分布限界のサクシヨン5kPa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¹⁸⁾、飽和度 $Sr=10\sim20\%$ の水を吸引する必要がある。しかし、サクシヨンがある一定値を超えると、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潮間帯側の分布限界のサクシヨン3kPaでは、サクシヨ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。ナミノリソコエビの分布限界であるサクシヨン2kPaでも同様のメカニズムで潜砂不能となることがわかっている^{16), 19)}。

以下では、これらの砂浜生物分布に果たす地盤環境適合場の役割の一般性について、常時・イベント時を通じた現地調査結果を基に検証している。

3. 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検証

図-3, 4に示す新潟県沿岸の5つの海浜で、典型的な3種の小型甲殻類、具体的にはヒゲナガハマトビムシ、ナミノリソコエビ、及び、ヒメスナホリムシを対象として、生物密度・分布と地盤環境動態の一体調査を実施し、常時及びイベント時の同結果を分析した。同日本海沿岸では、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る。先に示した図-2は、2009年～2011

図-3 常時・イベント時の調査対象の新潟県沿岸の5つの海浜

図-4 高波イベントに伴う調査を行った間瀬海浜の粒径分布

図-5 新潟県間瀬海浜の高波イベントに伴う岸沖地形

図-6 高波イベントに伴う岸沖サクシオン分布

図-7 高波イベントに伴う岸沖生物分布の変化

年にかけて同イベントが顕在化する前に実施した4海浜での上記3種の生物密度とサクシオンの関係であり、全ての生物においてその分布域がサクシオンと密接に関係し、上述の通り、それぞれサクシオンによる土砂硬さに伴う潜砂限界、土砂内部の水呼吸限界、及び、巣穴安定性の消失限界と地盤環境に基づく3つの異なる作用機構によって規定されることを明らかにしている。以下では、このような地盤環境適合場の一般性を高波イベントに照らして検証した。

図-5は、2015年10月及び11月に実施した高波イベントに伴う岸沖地形である。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堆積し地形が2段に顕著に変化していることがわかる。これに伴ってサクシオンの岸沖分布も図-6に示すように大きく変化した。実際、ヒゲナガハマトビムシの分布域であるサクシオン3kPa~10kPaの領域は、高波イベント前の10月には、護岸から30mの範囲であったのに対し、高波イベント後の11月には、

図-8 高波イベントに伴う岸沖生物密度とサクシオンの関係

海側に5m程拡大している。これに対応して、同生物の分布限界が海側に5m程延びていることが図-7よりわかる。同生息域の地盤高の範囲は10月と11月で異なることから、本結果は、高波イベントによる地形改変に伴って形成された地盤環境適合場に適応するかたちで同生物の生息域が拡大進展したことを表している。又、同生物を含む3種の岸沖生物密度とサクシオンの関係を図-8

に示す。本結果から、高波イベント後の各種の生物生息域は、それぞれの上記の地盤環境適合場の範囲によく収まっており、常時及び高波イベントを通じて、砂浜ベントスの地盤環境適合場の一般性について確認することができる。一方、イベント後の密度値は上述の3種いずれの生物でも常時より1オーダー程度低く、同イベントの影響の強さが顕れている。このような高波イベントに伴う生物量減少の回復過程も、地盤環境動態と密接に関係していると考えられ、これについては今後の課題である。

4. 結論

日本海沿岸の砂浜の保全・再生上、重要となる典型的な3種の小型甲殻類を対象として、砂浜の底生生物生態に果たす地盤環境の本質的役割に関する近年の研究結果を、室内試験による検証と合せて纏めて提示・分析すると共に、高波イベントに伴う生物生息分布の変化と常時及びイベント過程を通じた各種生物の地盤環境適合場の一般性について明らかにした。これらの知見は、砂浜の水産資源等の保全・管理に有効に活用することが期待できる。

参考文献

- 1) Defeo, O. and McLachlan, A., : Patterns, processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 295, pp. 1-20, 2005.
- 2) Schlacher, T.A. and Thompson, L., : Environmental control of community organisation on ocean-exposed sandy beaches. *Mar. Freshwater Res.*, 64, No. 2, pp. 119-129, 2013.
- 3) Brazeiro, A., : 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, pp. 113-120, 2005.
- 4) Defeo, O., Gomez, J. and Lercari, D., : Testing the swash exclusion hypothesis in sandy beach populations: the mole crab *Emerita brasiliensis* in Uruguay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 212, pp. 159-170, 2001.
- 5) Defeo, O. and McLachlan, A., : Coupling between macrofauna community structure and beach type: a deconstructive meta-analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 433, pp. 29-41, 2011.
- 6) Jaramillo, E., McLachlan, A. and Dugan, J., : Total sample area and estimates of species richness in exposed sandy beaches. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 119, pp. 311-314, 1995.
- 7) 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. *J. Sea Res.*, 55, pp. 128-140, 2006.
- 8) McLachlan, A., : Dissipative beaches and macroinfauna communities on exposed intertidal sands. *J. Coast. Res.*, 6, pp. 57-71, 1990.
- 9) McLachlan, A. and Dorvlo, A., : Global patterns in sandy beach macrobenthic communities. *J. Coast. Res.*, 21, pp. 674-687, 2005.
- 10) Sassa, S. and Watabe, Y., : 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, 2007.
- 11) 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*, 6(9), e25041, doi:10.1371/journal.pone.0025041, 2011.
- 12) Sassa, S. and Watabe, Y., : Persistent sand bars explained by geodynamic effects. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01404, doi:10.1029/2008GL036230, 2009.
- 13) Watabe, Y. and Sassa, S., : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation. *Mar. Geol.*, 252, pp. 79-88, 2008.
- 14) Sassa, S. and Watabe, Y., : Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 354, pp. 191-199, 2008.
- 15) Kuwae, T., Miyoshi, E., Sassa, S. and Watabe, Y., : Foraging mode shift in varying environmental conditions by dunlin *Calidris alpina*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 406, pp. 281-289, 2010.
- 16) 佐々真志・梁順普・渡部要一・梶原直人・高田宜武 : 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, Vol. B2-66, pp. 1126-1130, 2010.
- 17) 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. *J. Sea Res.*, 85, pp. 336-342, doi:10.1016/j.seares.2013.06.005, 2014.
- 18) Bally, R., : The respiration of the marine isopod *Excirolana natalensis* (Flabellifera; Cirolanidae) from an exposed sandy beach. *Comp. Biochem. Physiol.*, 74, pp. 625-629, 1983.
- 19) 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, 45 巻, pp. 151-156, 2008.

(2016.2.4 受付)

WAVE-INDUCED CHANGES IN SPECIES DISTRIBUTIONS AND THE ROLE OF GEOENVIRONMENT OF SANDY BEACHES

Soonbo YANG, Shinji SASSA, Keita WATANABE and Yoshitake TAKADA

This paper presents and discusses our recent research advances on the role of geoenvironmental dynamics in species distributions of sandy beaches, involving three typical amphipod and isopod species. In particular, wave-induced changes in the species distributions and the role of geoenvironmental dynamics are demonstrated. These findings will contribute to an effective management and conservation of sandy beach habitats.