

鳥と地盤と底生生物の關係に果たす水際土砂環境の役割

Role of Waterfront Geoenvironments in the Relationships between Birds, Sediments and Benthos

佐々真志¹・渡部要一²・桑江朝比呂³

Shinji SASSA, Yoichi WATABE and Tomohiro KUWAE

This paper describes the role of suction and related geophysical environmental conditions in the relationships between birds, sediments and benthos. We performed integrated sets of field observations/surveys and analyses at Roberts Bank and Sidney Bay in Canada and the Banzu flat in Japan. The results indicate that for a wide range of sediment types from fine sands to clay, suction is a performance index controlling the benthos diversity foraged by shorebirds. The suction dynamics was found to be closely linked to the feeding activity of Dunlins. We made clear the working mechanism in view of Ecological Geotechnics. The present finding highlights the importance of waterfront geoenvironments in the tidal flat ecosystems, and will effectively contribute to the conservation and restoration of habitats with diverse ecological activity.

1. はじめに

豊かな生物相を育み高い水質浄化能を有する干潟は、沿岸自然環境のシンボリック的存在である。このため、生態系や水質・水理環境を対象として国内外で活発に研究がなされてきており、主に生物の食物連鎖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、底生生物が住む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。

筆者らは、このような隘路を切り開くために、砂質干潟、泥質干潟ならびに浚渫土砂を含む造成干潟の土砂環境場を体系的かつ精確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、土中水分張力を担う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を形成する上で本質的な役割を果たしていることを見出した（佐々・渡部, 2005; 渡部・佐々, 2006; Sassa and Watabe, 2007; 佐々ら, 2007a, 2007b; Watabe and Sassa, 2008）。さらに、干潟の典型的な底生生物であるカニおよび二枚貝を対象として、巣穴生成や潜砂に代表される生物住活動と土砂物理環境の関わりを世界に先駆けて解明した（佐々・渡部, 2006a, 2007; Sassa and Watabe, 2008）。そして、良好な生物住活動を実現するために必要な土砂の性能とその評価・設計・管理の指針を提示している（佐々・渡部, 2006b; 佐々, 2007）。

本研究は、上述のような生態地盤学研究を、鳥の採餌活動と地盤ならびに底生生物の關係に展開したものである。

る。干潟に飛来する鳥は、食物連鎖の頂点に位置するため、生態系の指標生物として認識されており、鳥の食性や採餌形態ならびに環境負荷特性について近年活発に研究が展開されている（Piattら, 2007; Kuwae, 2007; 黄・磯部, 2007; Kuwaeら, 2008）。中でも、鳥の採餌場所の選択は土砂環境と密接に関係していることが示唆されてきたものの（Grant, 1984; Mouritsen and Jensen, 1992）、その具体的な原理・メカニズムについては、未解明であった。本研究では、以上を背景として、鳥と地盤と底生生物の關係に果たす土砂物理環境の役割を定量的に明らかにすることを目的としている。

2. 現地観測・調査と室内分析

本研究では、上述の研究目的を達成するために、土質や規模が顕著に異なるカナダの2つの干潟と日本の盤州干潟において、一連の現地観測と調査ならびに室内分析を実施した。以下では、先ず、上記調査干潟の特性を記した後、用いた研究手法と内容について記述する。

(1) 調査干潟の特性

調査干潟は、カナダ・フレーザー川河口に広がる岸沖4km以上の潮間帯を有する広大なRoberts Bank干潟と内湾の岸沖約100mのコンパクトなSidney Bay干潟、および東京湾の小櫃川河口に広がる盤州干潟の3つである。カナダの上記両干潟の土砂粒度分布を図-1に示す。Roberts Bank干潟の土砂（図-1(a)）は、岸沖方向に、粘土から細砂までの幅広い粒度分布を有しているのに対し、Sidney Bay干潟の土砂（図-1(b)）は、均質な細砂である。この際、上記両干潟の細砂の粒径（ $D_{50} \approx 0.2\text{mm}$ ）は、盤州干潟の岸沖土砂の粒径（Sassa and Watabe, 2007）とほぼ対応している。

上記3つの干潟は、数多くのシギ・チドリ類が飛来し採餌活動を行う場所として知られている。本研究では、これらの干潟と日本全国に共通して飛来する代表的なシ

1 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 主任研究官
2 正 会 員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 土質研究チームリーダー
3 正 会 員 博(農) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 主任研究官

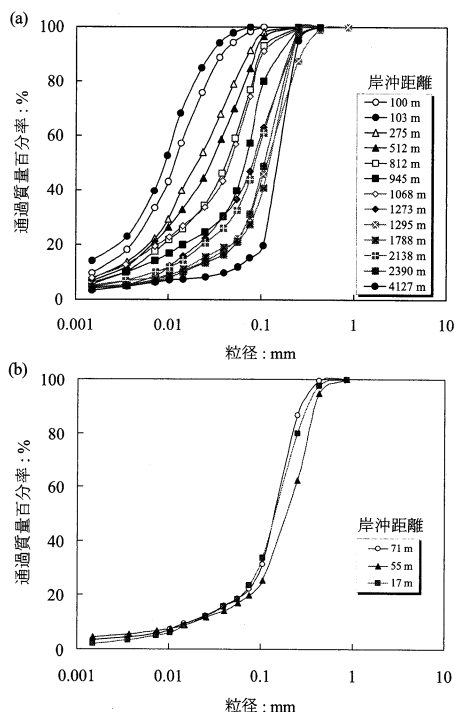


図-1 調査干潟の粒度特性: (a)Roberts Bank; (b)Sidney Bay

ギ類であるハマシギを対象として、詳細な分析・検討を行った。

(2) 土砂物理環境／底生生物分布の現地調査

夏の大潮時に対応する2007年7月27日～31日に、Roberts Bank干潟において、同年8月1日にSidney Bay干潟において、各日の干潮時に土砂物理環境／底生生物分布の一体調査を行った。当該期間の潮位差は、Roberts Bank干潟で約3.5m, Sidney Bay干潟で約2.7mであった。岸沖代表測線に沿って、Roberts Bank干潟では12地点で、Sidney Bay干潟では3地点で、表層土砂（深さ50mm）の不攪乱サンプリング、サクシオン計測、ベーンせん断試験、および生物分析用のコアサンプル（直径20mm、深さ50mm、各地点4本ずつ）の採取を行った。この際、サクシオンとベーンせん断強度の計測には、盤州干潟の詳細調査で使用した携帯型テンシオメータ（Sassa and Watabe, 2007）と小型ベーンせん断試験器（Sassa and Watabe, 2007）を用いた。

(3) 鳥の採餌活動の現地観測

上述のカナダの両干潟における土砂物理環境／底生生物分布調査と平行して、可視光望遠ビデオカメラ（Kuwaieら, 2008）を用いた鳥の採餌活動の観測を行った。盤州干潟においては、冬の大潮時に対応する2003年1月27日～31日および2004年1月19日～23日の間の干潮時に、上記望遠カメラによる連続ビデオ記録（Kuwaie, 2007）

を通じて、ハマシギの採餌活動の詳細な観測を行っている。具体的には、干出後の経過時間とともに、ランダムにビデオ記録用の鳥個体を選出し、1個体あたり約2分間、計140個体について観測した。

(4) 室内分析

不攪乱サンプリングした土砂の室内物理試験を通じて、現地干潟土砂の粒度、コンシステンシーおよび間隙比を得た。この際、佐々ら（2007b）の方法に基づき、粒度とサクシオン計測値の情報から、カナダの両干潟とも盤州干潟と同様に干出時に土砂が飽和状態にあったことを確認している。

生物分析においては、上述の調査地点ごとに採取したコアサンプルを冷凍保存し10%ホルマリンで固定した後、篩を用いて0.5mm以上のマクロベントスを選出し、種の同定と種別の個体数の計数およびサイズ測定を行った。そして、その結果を対応する土砂物理環境の調査結果と突き合わせた。

上述の望遠ビデオカメラで取得した動画をスローモーションとストップ・リプレイモードで繰り返し再生すること（Kuwaie, 2007）により、通常0.2s以内で完了するハマシギの採餌活動形態の詳しい分析を可能にしている。その結果、ハマシギの採餌形態として、地表面を嘴でついで“Pecking”と土中に嘴を入れる“Probing”の2種類を同定した。そして、採餌活動の詳細観測を実施した盤州干潟の土砂環境分布・動態（Sassa and Watabe, 2007, 2008）に基づいて、観測地点域でのサクシオン動態を評価し、これと得られた採餌活動形態の分析結果と突き合わせた。

3. 結果と考察

ハマシギの採餌活動の観測結果から、その採餌が常に干出時の地盤水際で行われていることが明らかとなった（写真-1）。以下では、このような水際土砂環境の物理と鳥ならびに底生生物の関わりについて記述する。



写真-1 シギ類の干出時水際地盤での採餌活動の様子

表-1 調査干潟において同定した底生生物種のリスト

動物門	綱	目	科	学名	和名
刺胞動物	花虫			ANTHOZOA	花虫綱
軟体動物	二枚貝	ハマグリ	ニッコウガイ	<i>Macoma</i> sp.	シトリガイ属
			アサシガイ	SEMELIDAE	アサシガイ科
			マルスタレガイ	VENERIDAE	マルスタレガイ科
			ウミタケガイモドキ	<i>Laternula</i> sp.	
				BIVALVIA	二枚貝綱
環形動物	ゴカイ	サシハゴカイ	シリス	SYLLIDAE	シリス科
			ゴカイ	NEREIDAE	ゴカイ科
		ホコサキゴカイ	ホコサキゴカイ	ORBINIIDAE	ホコサキゴカイ科
			スピオ	SPIONIDAE	スピオ科
		イトゴカイ	イトゴカイ	CAPITELLIDAE	イトゴカイ科
			タケフシゴカイ	MALDANIDAE	タケフシゴカイ科
		フサゴカイ	カザリゴカイ	AMPHARETIDAE	カザリゴカイ科
			ケヤリムシ	SABELLIDAE	ケヤリムシ科
		ミミズ	イトミミズ	TUBIFICIDAE	イトミミズ科
節足動物	甲殻	カイアシ		HARPACTICOIDA	ハルバクチス亜目
		クマ		CUMACEA	クマ目
		タナイス	タナイス	TANAIDAE	タナイス科
				TANAIDACEA	タナイス目
		ヨコエビ	ユンボソコエビ	<i>Grandidierella</i> sp.	
			トログダムシ	Corophiinae	
			キタヨコエビ	ANISOGAMMARIDAE	キタヨコエビ科
			ヒサシソコエビ	PHOXOCEPHALIDAE	ヒサシソコエビ科
				GAMMARIDEA	ヨコエビ亜目

調査干潟において同定した底生生物種のリストを表-1にまとめている。本表より、刺胞動物（花虫）、節足動物（甲殻類）、環形動物（多毛類）および軟体動物（二枚貝）の各動物門に属するヨコエビ、イトゴカイ、ハマグリ等の計24種が得られたことがわかる。これらの底生生物の多くは、Roberts Bank干潟とSidney Bay干潟に共通した生物種であり、かつ、シギ類が典型的に捕食するような大きさ数mm程度の小型マクロベントスが主であっ

た。

底生生物の種類数とサクシジョンの関係を図-2(a)に示す。本図より、サクシジョンと生物多様性の間には、均一な粒度を有するSidney Bay干潟では極めて明瞭な、幅広い粒度を有するRoberts Bank干潟でも十分有意な相関(Mann-Whitney U-test, $p < 0.05$)があることがわかる。実際、粘性土・砂質土に依らず、サクシジョンが低下し土中水分張力が開放されるにつれて、生物種類数が顕著に増

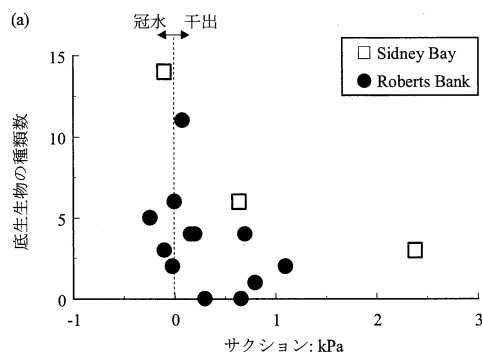


図-2 (a) 底生生物の種類数とサクシジョンの関係

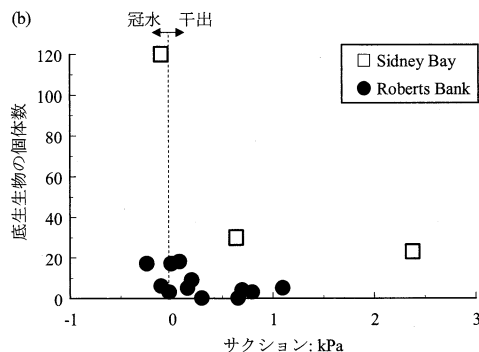


図-2 (b) 底生生物の個体数とサクシジョンの関係

加していることがわかる。このことは、多様なマクロベントスを食物源とするハマシギの上記水際地盤での採餌活動の選択性をよく説明している。

底生生物の個体数とサクシジョンの関係 (図-2 (b))でも、上述と同様の密接な相関を確認することができる。しかし、生物個体数は Sidney Bay 干潟に比べて Roberts Bank 干潟では1/6以下と顕著に少なかった。このことは、同干潟では、鳥がマクロベントス以外に微生物を食物源として活用していること (Kuwaieら, 2008)を傍証するものである。

干潟土砂のペーンせん断強度は、Roberts Bank と Sidney Bay の両干潟を通じて、土質に依らず、サクシジョンと強い相関を有していた (図-3)。実際、干出地盤においてサクシジョンが1kPa違うと、せん断強度にして約5倍に及ぶ硬さの変化が生じていることがわかる。当該せん断強度が、底生生物の住活動性能を支配していること (佐々・渡部, 2006a, 2007; Sassa and Watabe, 2008)を踏まえると、上述図-2の結果は、サクシジョン動態による顕著な土砂収縮・硬化が生じない水際地盤が小型マクロベントスの住環境として適していることを表している。

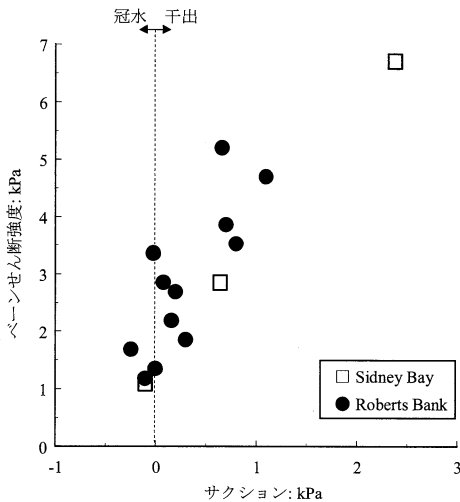


図-3 ペーンせん断強度とサクシジョンの関係

また、興味深いことに、上述のような水際の適合土砂環境場の存在は、Roberts BankとSidney Bayの両干潟を通じて、生物種類数ならびに生物個体数が急増するような最適間隙比 $e \cong 0.9$ を生み出していた (図-4 (a), (b))。このことは、土砂間隙状態が、サクシジョンやせん断強度とともに、底生生物の住環境の形成に重要な土砂性能となることを示している。

地表面を嘴でついむ“Pecking”と土中に嘴を入れる“Probing”に分類された鳥の採餌活動形態とサクシジョン動態の関係の分析結果を図-5に示す。本図は、盤州干

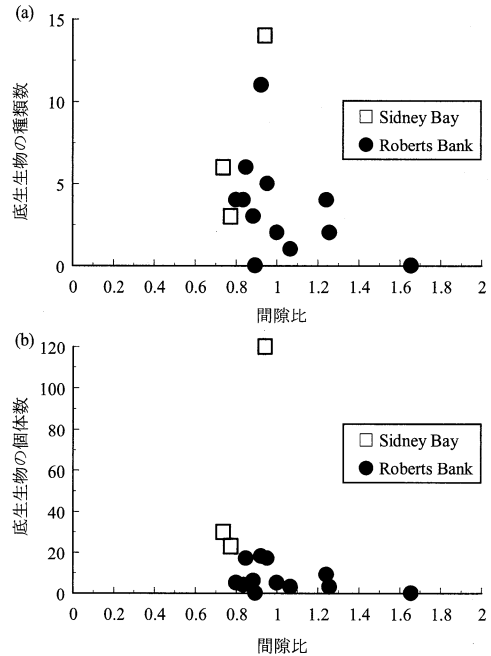


図-4 底生生物の種類・個体数と間隙比の関係

潟において観測同定したハマシギの全採餌活動に対する Probingの割合を、対応する土砂表層のサクシジョン値と合せてプロットしたものである。本結果から、ハマシギの採餌活動形態が、サクシジョンの動態と密接にリンクしていることが確認できる。すなわち、干出後の経過時間にともなうサクシジョン値の上昇とともに、Probingの割合が顕著に低下していることがわかる。実際、サクシジョンが0.5kPa発達し表層土砂強度が3倍増加すると (図-3参照)、Probingの割合は半減した。結局、これらのことは、干出後のサクシジョン上昇にともなう土砂強度の増加が、Probingの物理的限界を与えたことによって、鳥の活動が採餌効率性の低いPeckingに次第にシフトしていったことを如実に示している。

ここで、本研究で得られた自然干潟の生物多様性とサクシジョン間の密接な関係が、造成干潟に対しても適用しうるものであることを、干潟再生事業の成功例を参照して補足しておく。浚渫土砂を活用した尾道造成干潟における調査・観測結果 (国土交通省中国地方整備局, 2006; 佐々, 2007)によると、サクシジョンは、他の既往の環境指標を大きく上回り、生物種類数と非常に高い相関があることが明らかとなっている。このことは、上記関係の一般性を裏付けるものである。

4. まとめ

生態/土砂物理の関わりに着目して筆者らが開拓した

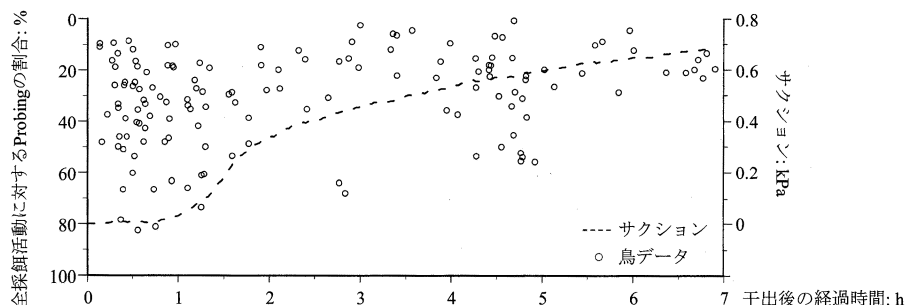


図-5 ハマシギの採餌活動とサクシヨン動態の関係

生態地盤学研究を鳥と地盤と底生生物の関係に展開した。その結果、干潟土砂の間隙や強度の形成に本質的な役割を担うサクシヨンが、細砂から粘土までの幅広い土質に対して、多様な底生生物の生息を規定する性能指標であり、かつ、鳥の採餌活動と密接にリンクしていることを見出した。そして、生物活動の適合・限界土砂環境場の観点から、これらの制御メカニズムを明らかにした。

とりわけ、本結果は、鳥の効率的な採餌活動ならびに底生生物の多様性の発現を支配する“水際”サクシヨンの重要性を浮き彫りにしている。

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を初めて定量的に示した本研究の成果は、干潟生態系の保全・再生に向けた水際土砂環境の性能評価・設計・管理の実現に有効に寄与するとともに、今後のさらなる発展が期待できる。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究B 課題番号 18360232と20360216、および若手研究A 課題番号 20681023）の助成を受けて実施したものである。底生生物の室内分析においては、(株) いであ 環境生態グループの風間真紀氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 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～。
- 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ヨン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 52巻, pp. 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巻, pp. 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ヨンの役割—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巻, 4号, pp. 61-107。
- 佐々真志・渡部要一・川野泰広・中島謙二郎・吉田秀樹

- (2007a)：泥質干潟再生に向けた土砂環境動態評価手法の開発：自然泥干潟および干潟実験施設への適用, 海洋開発論文集, 23巻, pp. 507-512。
- 佐々真志 (2007)：生態地盤学の創成と土砂性能照査型干潟再生指針の開発, 平成19年度港湾空港技術講演会講演集, pp. 29-50。
- 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巻, pp. 1196-1200。
- 佐々真志・渡部要一・石井嘉一 (2007b)：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巻, pp. 1151-1155。
- 黄光偉・磯部雅彦 (2007)：渡り鳥集団飛来による閉鎖水域への栄養塩負荷推定に関する研究, 土木学会論文集 B, Vol. 63, No. 3, pp. 249-254。
- 渡部要一・佐々真志 (2006)：干潟堆積構造の地球物理学的評価と形成要因：砂質・泥質・砂泥二層干潟, 海岸工学論文集, 53巻, pp. 1236-1240。
- Grant, J. (1984)：Sediment microtopography and shorebird foraging. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 19, pp.293-296。
- Kuwae, T. (2007)：Diurnal and nocturnal feeding rate in Kentish plovers *Charadrius alexandrinus* on an intertidal flat as recorded by telescopic video systems. *Marine Biology*, Vol. 151, pp. 663-673。
- Kuwae, T., P. G. Beninger, P. Decottignies, K. J. Mathot, D. R. Lund and R. W. Elner (2008)：Biofilm grazing in a higher vertebrate: The western sand piper, *Calidris mauri*. *Ecology*, Vol. 89, No. 3, pp. 599-606。
- Mouritsen, K. N. and K. T. Jensen (1992)：Choice of microhabitat in tactile foraging dunlins *Calidris alpina*: the importance of sediment penetrability. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 85, pp.1-8。
- Piatt, J. F., W. J. Sydeman and H. I. Browman (2007)：Seabirds as indicators of marine ecosystems, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 352, Theme section: pp. 199-309。
- Sassa, S. and Y. Watabe (2007)：Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575。
- Sassa, S. and Y. Watabe (2008)：Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 354, pp. 191-199, doi:10.3354/meps07236。
- Watabe, Y. and S. Sassa (2008)：Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation. *Marine Geology*, Vol. 252/3-4, pp. 79-88。