# 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

Performance and Mechanics of Self-burial Activities of Bivalves, Japanese Littleneck

佐々真志<sup>1</sup>·渡部要一<sup>2</sup>·梁 順普<sup>3</sup>

## Shinji SASSA, Yoichi WATABE and Soonbo YANG

We investigated in detail the performance and mechanics of self-burial activities of bivalves, Japanese Littleneck, from juvenile to adult, by utilizing our new approach encompassing ecology, geophysics and geotechnics. The observed speeds, angles and depths of the self-burial were all governed by the bed surface shear strength irrespective of the types of materials. The increase in the surface shear strength induced the mode shift from the vertical self-burial to inclined and/or partial self-burial, ultimately reaching the non-self-burial state. This self-burial mode shift can be consistently explained by the proposed conceptual model in view of required energy principle. There exists an optimal stage of growth, at which the bivalves can achieve the highest capabilities, below or above which the self-burial capabilities decrease continuously.

## 1. はじめに

大気,海,地盤が出会う場である干潟域は,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 ンボル的存在である.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 分張力を表し大気圧を基準とした負の間隙水圧で定義さ れる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,ならびに,生物住活動と土砂物理環境の密接な 関わり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, 2006, 2007; Sassa and Watabe, 2007, 2008, 2009;佐々ら, 2007a, 2007b, 2008, 2009). とりわけ、干潟の典型的な巣穴底生生物であるコメツキ ガニを対象として、サクション、間隙、強度等の土砂物 理環境が巣穴活動の臨界・最適・限界条件を支配してい ることを見出している (Sassa and Watabe, 2008). 本研

1	正会員	博(工)	(独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
2	正会員	博(工)	主任研究目 (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
3	正会員	博(工)	土質研究チームリーダー (独法)港湾空港技術研究所 地盤・構造部
			土質研究チーム特別研究員

究は、このような生態地盤学研究を二枚貝のアサリの潜 砂活動に展開したものである.

水産有用種であるアサリは、干潟の保全・再生事業 (国土交通省港湾局, 2003) において, 要の底生生物と なっており、その生息生育条件の解明は重要課題である. 実際、これまでに食性をはじめ、水温・塩分等の水質環 境,波浪·潮位等の水理環境,強熱減量や酸化還元電位 等の化学環境ならびに底質粒径等の材料物性や地形変動 と,アサリの生息生育活動の関わりについて知見が蓄積 されていきている(柿野ら, 1991;櫻井・瀬戸, 1996; 新保ら, 2000; Yokoyamaら, 2005; 越川・田中, 2006). しかし、アサリが生息する地盤表層の土砂物理環境と当 該生物活動の関係に関する実証的研究はほとんどないと いってよい. 例えば、底質の硬さや強度はアサリの生息 限界と密接に関わっていると考えられている(阿久津ら, 1995).しかし、従来研究では、地盤深部における相対 的な固さを評価しているために, 当該生物活動に適合し た土砂環境条件が,未だよくわかっていなかった.

本研究は、上述の生態地盤学の展開によって、底質の 表面硬さが二枚貝の潜砂活動の性能を支配していること を明らかにした佐々・渡部(2007)に基づき、稚貝から 成貝までのアサリの潜砂特性、性能ならびにそのメカニ ズムを詳しく調べたものである.一般に、アサリ稚貝は 全潮位帯に広く加入するにもかかわらず,成貝の分布は低 潮帯に限られることが知られており、本研究はこのよう な成長段階の違いによる生物分布の解明に対しても有用 な洞察を与えることを目的としている.

### 2. 稚貝から成貝までのアサリの潜砂性能実験

日本各地の3つの自然干潟(盤州干潟,野島干潟,風 蓮湖干潟)より採取した殻長L=2mm~50mm(個体重量 w=0.004g~31.6g)までのアサリを,11段階の大きさに

++++ ++++

分類し、気温・水温を一定に保った室内海水槽で1ヶ月 以上馴致した後、一連の潜砂性能実験(計96ケース)を 実施した.この際、アサリの個体重量wは、採取場所に 依らず、殻長Lの単一の関数となることを確認している (佐々ら、2009).

気温,水温,塩分を統一し、現地干潟土砂(野島干潟) と粘着性材料を模擬しかつこれまでに有効性を実証した 海水寒天(佐々・渡部, 2007)の2種類を底質材料とし て,透明円筒容器内に直径100mm,高さ100mmの模型 地盤を作成した.均質な地盤の作成は、本実験の要であ るため、ここでその作成法について補足する. 寒天地盤 は、沸騰した海水に所定の濃度の粉末寒天を3時間かけ て攪拌混合し、12時間冷蔵の後、所定の常温に戻し、表 面の薄膜を除いて作成した. 土砂地盤は, 水槽内に設置 した上記容器内に水深を一定に保った水中落下法 (Sassa & Watabe, 2007) により作成し、容器周りをハン マーで小刻みに振動させて所定の相対密度を実現した後 に,水槽内の水位を調節して水位/地下水位を設定し, 所定のサクション(冠水の場合は負)を地盤表層に負荷 した.そして、両底質材料の表面硬さを表すベーンせん 断強度を評価した(図-1参照).すなわち、土砂の最表 層を捉えるベーンブレード(佐々・渡部, 2007)を装着 した、室内ベーンせん断試験機と現地で使用可能なハン ドベーン (Sassa & Watabe, 2007) の双方を用いて回転せ ん断速度を一定(60°/min.)に保持してベーンせん断試 験を行った.図-1に示すように現地使用機器で十分な精 度を確認することは、次章に述べる知見を現場に適用す る上で重要である.

上述のように底質の物理環境の精緻な制御を実現した 上で,各設長に対して12個体以上,計n=483個体を用い て,アサリが足を底質に接地した後の潜砂応答,具体的 には,潜砂時間,潜砂速度,潜砂角度,および潜砂深さ を6時間にわたり調べた.本実験結果の一例として,殻 長L=20mmのアサリの潜砂深さの時間変化を図-2に示す. 同図より,寒天濃度の上昇による底質表面硬さの増加は, 潜砂深さと潜砂速度の双方に大きく影響を及ぼし両者を



図-1 干潟土砂と海水寒天のベーンせん断強度特性

小亚/ 抽下水位	リクション	111 					
mm	kPa %		19~21	29~31	49~51		
20 (40)	-0.2 (-0.4)	40	n=7 a=7	n=3 a=1, b=2	n=4 a=1, b=3		
3	-0.03	40	n=2 a=2				
0	0	40	n=4 a=4	n=3 a=1, b=2			
20 (40)	-0.2 (-0.4)	60	n=7 a=7	n=3 a=1, b=2	n=2 b=2		
3 (5)	-0.03 (-0.05)	60	n=4 a=4	n=3 a=2, c=1			
-5	0.05	40	n=4 a=1, b=3				
20 (40)	-0.2 (-0.4)	80	n=4 a=2, b=2	n=3 a=2, c=1	n=2 b=1, c=1		
3 (5)	-0.03 (-0.05)	80	n=4 a=1, b=3	n=6 a=2, b=4			
0	0	60	n=4 b=4	n=3 b=1, c=2			
0	0	80	n=4 b=2, c=2	n=3 b=1, c=2	n=4 c=4		
-10	0.1	40	n=4 b=2, c=2				
-5	0.05	60	n=4 b=3, c=1	n=4 c=4			
-15	0.15	40	n=4 a=1, b=1, c=2	n:個体数 a:鉛直潜砂可			
-10	0.1	60	n=4 c=4	『分潜砂 「			
-20	0.2	40	n=4 c=4	n=4 c=4   気温:18.7±1.1℃ 水温:17.5±1.1℃			
-5	0.05	80	n=4 c=4	塩分濃度:2.7% ():L=30,50mmの場合			

表-1 干潟土砂を用いたアサリの潜砂性能実験プログラムの まとめ(気温・水温は平均±標準偏差)

有意に低下させることがわかる.

本実験のプログラムのまとめを表-1及び表-2に示す.同 表中のnは各実験条件において用いたアサリの個体数であ り,実験結果の概要も合せて記している.この際,各設長



図-2 海水寒天におけるアサリL=20mmの潜砂性能実験結果

表-2 海水寒天を用いたアサリの潜砂性能実験プログラムのまとめ(気温・水温は平均±標準偏差)

寒天濃度	設長L:mm										
g/l	2~4	4~6	6~8	10~12	14~16	19~21	$24\!\sim\!26$	29~31	34~36	44~46	$49\!\sim\!51$
1	n:個体数				n=1 自沈	n=1 自沈					
1.25	a. 新旦沿砂可 b:傾斜・部分潜砂					n=4 a=4					
1.5	気温:20.8±1.1℃ 水温:19.2±1.1℃ 塩分濃度:2.7%				n=4 a=4				n=1 自沈	n=1 自沈	n=1 自沈
1.75											n=3 a=3
2	n=4 a=4	n=4 a=4	n=4 a=4		n=4 a=4		n=3 a=3	n=3 a=3		n=4 b=4	n=7 a=3, b=4
2.25							n=3 a=3	n=3 a=3	n=3 a=3	n=3 b=3	n=8 b=8
2.5	n=8 a=8	n=5 a=5	n=8 a=8	n=4 a=4	n=4 a=4	n=4 a=4	n=3 b=2, c=1	n=3 a=2, c=1	n=3 b=3	n=3 a=1, b=1, c=1	n=7 b=3, c=4
2.75	n=5 a=2, b=1, c=2	n=5 a=2, b=1, c=2				n=4 a=4		n=3 a=1, c=2	n=3 b=3	n=3 b=1, c=2	n=7 b=1, c=6
3	n=7 a=1, c=6	n=8 a=2, b=1, c=5	n=4 a=4	n=5 a=5	n=8 a=8	n=12 a=12	n=5 a=2, b=1, c=2	n=3 a=1, c=2	n=3 c=3		n=2 c=2
3.25	n=6 b=1, c=5	n=9 b=2, c=7	n=6 a=3, b=1, c=2	n=5 a=5	n=4 a=4	n=4 a=2, b=1, c=1	n=3 b=2, c=1	n=3 b=2, c=1	n=3 c=3		n=4 c=4
3.5	n=4 c=4	n=4 c=4	n=7 a=1, b=1, c=5	n=6 a=2, b=2, c=2	n=4 a=1, b=1, c=2	n=8 a=2, b=2, c=4	n=3 c=3	n=3 c=3			
3.75		n=3 c=3	n=7 b=1, c=6	n=6 a=1, b=1, c=4	n=8 a=2, b=1, c=5	n=4 a=2, b=1, c=1	n=3 c=3	n=3 c=3			
4			n=5 c=5	n=4 c=4	n=4 a=1, c=3	n=8 b=1, c=7		n=3 c=3			
4.25			n=4 c=4	n=4 c=4	n=4 c=4	n=4 c=4					
4.5					n=4 c=4						

に対応する実験結果は、図-1を参照して、底質の表面硬さ が低い方から高くなる方に向けて順に並べたものである. ここに、鉛直潜砂可とは、図-3の模式図を参照して、アサ リが鉛直方向( $\theta = 90 \pm 10^{\circ}$ )に潜り、かつ、その体全体 が当初の地表面以下に没して潜砂を完了した(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 の際の $\theta$ とは潜砂完了時の $\theta$ である.また、傾斜・部分潜 砂とは、アサリが傾斜( $0 < \phi < 80^{\circ}$ )して潜る、または、鉛 直方向に潜っても潜砂が途中で止まってしまった(-1 < z < 0) 状態を表している.そして、潜砂不可とは、潜砂が全く不 能である状態(z = 0かつ $\theta = 0$ )を表している.

#### 3.実験結果と考察

本実験結果の全体像について先ず記述する.上述のように図-1との比較対応の下に表-1及び表-2をみると,干 潟土砂と寒天の両材料とも,各殻長において,底質の表 面硬さが高くなるにつれて(表の上から下に向かって), 鉛直潜砂可の状態から傾斜・部分潜砂の状態に変化し, 最終的には潜砂不可状態となっていることがわかる. このような潜砂モード及び性能の変化をより詳しくみ るために、干潟土砂における代表的な実験結果(L= 20mm)を図-3に示す.同図より、ベーンせん断強度が 低い範囲( $\tau^* < 0.1$ kPa)では、用いた全てのアサリ個体が 鉛直潜砂を完了した.しかし、当該強度 $\tau^*$ 値が0.1kPaを 上回ると、潜砂不可個体が現れ始めるとともに潜砂モー ドが傾斜・部分潜砂へと移行した.実際、潜砂角度 $\theta$ ・ 深さ $|z^*|$ とも、相対密度( $D_r$ =40、60、80%)によらず、  $\tau^*$ 値が上昇するにつれて有意に低下した.そして、 $\tau^*$ 値 が0.25kPaを超えると、全てのアサリ個体が潜砂不可と なった.

本研究では、上述のような潜砂特性の変化を生物応答 のエネルギー原理により説明しうる概念モデル(図-4) を構築している.すなわち、アサリの立ち上がりと体挿 入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.

$$E = \frac{L}{2} \cdot \theta \cdot w(L) \cdot g + \tau^* \cdot a \cdot L^3 \cdot \sin \theta \cdot \left| z^* \right| \le E_c(L) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここにaはアサリ形状に関する係数, E<sub>c</sub>(L)は殻長に依



図-3 干潟土砂におけるアサリL=20mmの潜砂性能実験結果



図-4 最適・遷移・限界潜砂領域を説明する潜砂エネルギー 概念モデル

存した潜砂エネルギー容量である.自沈強度  $\tau_s^*$ 上で鉛 直潜砂可能な最適領域 ( $\tau_s^* < \tau^* < \tau_{OP}^*$ )では,  $E < E_c(L)$ が 成立し,自らの潜砂エネルギー容量内で自然に潜砂を完 了することができる.しかし, $\tau^*$ 値が当該領域を上回る 遷移領域 ( $\tau_{OP}^* \le \tau^* \le \tau_{CR}^*$ )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,アサリは, 式(1)に照らして,傾斜潜砂モードに遷移することによ って, $\tau^*$ 値の増加による容量オーバーのエネルギー分を 補償しようとする.それゆえ,当該領域では, $\tau^*$ 値が増 加するにつれて,潜砂角度 $\theta$ 及び深さ $z^*$ が低下すること になる.そして,限界領域(*τ*\*>*τ*<sub>CR</sub>\*)になると,あしの挿入自体が不可となる.

以上の概念モデルによると、本実験で観測された潜砂モ ード及び潜砂性能の変化を整合的に説明することができる.

上述のような潜砂性能を特徴づける3つの潜砂領域は、 アサリの殻長を問わず存在し、かつ、その発現を規定す る最適・限界強度 $\tau^*_{OP}$ 及び $\tau^*_{CR}$ は、任意のアサリの殻長 の下で、図-5に示すように異なる底質材料間で整合した.

稚貝から成貝までのアサリの潜砂性能実験結果のまと めを図-6に示す.先ず,図中の自沈領域は, 殻長Lの増 加にともなう重量の上昇特性(佐々ら,2009)に対応し て,その自沈強度が増加していくことがわかる.自沈強 度上には,上述のように全個体が鉛直潜砂可能な最適領 域,傾斜・部分潜砂に変化する遷移領域,および全個体 が潜砂不可となる限界領域が,各殻長に対して存在する. この際,とりわけ興味深いことは,各潜砂領域の $\tau_{OP}$ \*と  $\tau_{CR}$ \*によって特徴づけられる最適・限界潜砂性能が,殻 長によって大きく異なり,かつ,成長段階によってピー ク性能が発揮されることである.

具体的には,限界潜砂性能では,アサリの幅広い殻長 範囲の中で,L=15~20mmで最も高く,これを基準とし て,小さくなるとL=2mmで約6割の性能に,大きくなる とL=50mmで約1/2の性能まで低下していることがわか る.一方,最適潜砂性能では,殻長による変化特性がさ らに顕著になり,L=10~15mmでピーク性能をむかえて, これを基準として,小さくなるとL=2mmで約1/2の性能 に,大きくなるとL=50mmで約1/3の性能まで低下した. 最適潜砂領域は,自らの潜砂容量内で迅速に潜砂可能な 領域であるため,現地の様々なリスク下では特に重要に なるといえる.

現地干潟では,地下水位・サクションの発達にともな い土砂強度が大きく増加する (Sassa and Watabe, 2007) ため,上述の成貝に向けた最適潜砂性能の顕著な低下は, 本論文の序論で述べた稚貝と成貝の生息分布の違いをよ く説明している.



さらに, 漂砂・地形変動は, アサリの生息環境と密接

図-5 異なる底質材料におけるアサリの潜砂性能実験結果: (a) L=20mm, (b) L=30mm, (c) L=50mm



に関わる(越川・田中,2006)ことから,上述の成長段 階の違いによる潜砂性能の顕著な差異は,現地漂砂環境 の下での生息・生存率にも多大な影響を及ぼしていると 考えられる.

## 4.まとめ

生態/土砂物理の関わりに着目して筆者らが先駆的に 開拓した生態地盤学の展開によって,稚貝から成貝まで のアサリの潜砂性能を系統的かつ包括的に解明した.

すなわち,アサリの潜砂性能は,1) 潜砂速度・深さ・ 角度を表し,その全てが,粒状体・粘着性材料の種類や アサリの殻長によらず,底質の表面せん断強度によって 支配されること,2) 自沈領域上で鉛直潜砂可能な最適領 域,潜砂モードが傾斜・部分潜砂に変化する遷移領域, ならびに,潜砂不可となる限界領域によって特徴づけら れること,3) 提案する潜砂エネルギー概念モデルにより 2) の発現形態ならびに底質表面強度の増加にともなう潜 砂特性の変化を整合的に説明できること,4) 最適・限界 潜砂性能とも,殻長L=2mmから10mmにかけて上昇し, L=15mmで最高性能を発揮した後,50mmまで大きくなる につれて低下することを初めて明らかにした.

以上のような潜砂活動の最適・限界場の存在と成長段 階の違いによる潜砂性能の顕著な差異は,稚貝から成貝 までのアサリの生息分布や生存率に大きく影響を及ぼす と考えられるため,全国的に減少しているアサリ資源の 復活及びその保全・管理を図る上できわめて重要である.

謝辞:本研究は、科学研究費補助金(基盤研究B,研究 代表者 佐々,課題番号20360216)の助成を受けた.

#### 参考文献

- 阿久津孝夫・山田俊郎・佐藤 仁・明田定満・谷野賢二 (1995) :アサリの生息と底質の硬度, 粒度との関係につ いて, 開発土木研究所月報, 503号, pp. 22-30.
- 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巻,pp.51-55.

- 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.
- 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巻,土 木学会, pp.1211-1215.
- 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巻,pp.878-885.
- 佐々真志・渡部要一(2005):砂質干潟の土砂環境場におけ るサクショ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(2006):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・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・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.
- 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巻, pp.1171-1175.
- 佐々真志・渡部要一・梁 順普(2009):多種多様な干潟底 生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係,海岸工 学論文集,56巻,印刷中.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷 毅・越川義功(2000) :アサリ を対象とした生物生息地適性評価モデル,海岸工学論文 集,47巻,pp.1111-1115.
- 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.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2009): Persistent sand bars explained by geodynamic effects. Geophysical Research Letters, Vol. 36, L01404, doi:10.1029/2008GL036230.
- Yokoyama, H., A. Tamaki, K. Koyama, Y. Ishihi, K. Shimoda and K. Harada (2005): Isotopic evidence for phytoplankton as a major food source for macrobenthos on an intertidal sandflat in Ariake Sound, Japan. Marine Ecology Progress Series, Vol. 304, pp. 101-116.