

— 総説 —

## 底生生物の生息環境指標としての底質の硬度\*

梶原 直人†

### 要 旨

潜砂・管棲を行う底生生物にとって、底質の性状は非常に重要な要素の一つである。しかしながら底質の粒径やその堆積型から底生生物の生息環境を解析する従来の手法は、泥底や砂浜海岸汀線域などに適用することが難しかった。一方、近年、底質の硬度指標を用いてこれらの底質に生息する底生生物の生息環境を解析する手法が開発され、成果を挙げている事例が見られる。

そこで、本稿ではこれらの実例を紹介するとともに、底質硬度の測定法や底質硬度に関連の深いサクション、飽和水面、飽和度、粘着力などの物理指標について紹介するとともに、その背後となる原理について考察して、底生生物の生息環境としての底質硬度に対する理解を深めることを目指した。さらに、底質硬度を用いた今後の展開や生息環境としての新たな物理指標の可能性についても検討を行った。

キーワード：硬度，サクション，底生生物，泥底，汀線

### 1. はじめに

一般に海底を構成する堆積物は礫・砂・泥に大別されるが、その各々あるいはそれらの組み合わせによって極めて多様な底質環境を構築している。また、堆積物で構成される海底には、多くの底生生物が様々な生活様式で分布している。なかでも潜砂や管棲により底質への依存が高い生活様式を持つ小型の底生生物においては、その分布が底質を構成する堆積物、とりわけ砂質堆積物の粒径や粒度分布等の堆積型と関連づけられて解析されてきた (Biernbaum, 1979; Gray, 1974; Rhoads, 1974;

Sanders, 1958; 東ら, 1985)。さらに、底生生物と底質の同時採集・調査において観察される、底質の粒度分布や堆積型による近縁種の棲み分けについても、種毎の潜砂及び棲管作成能力の範囲とその差異によって説明できることが明らかとなっている (梶原, 1999)。ところが、砂質堆積物底であっても砂浜海岸汀線域では、生物が明確な帯状分布を示しながらも、底質の粒度や海岸勾配などの要素とは明瞭な相関を示さない場合があり、好適生息環境とその要因が不明であると指摘された (奥村ら, 2001; Brown and McLachlan, 2002)。一方で、同じ堆積物底であっても泥底では粒径が非常に細かいため、粒径の差による種毎の潜砂及び棲管作成能力の範囲に基づく分布域の相違では説明できない事例であるにもかかわらず、小型底生生物の密度が泥底内でも大きく異なることが経験的に知られていた (林, 1984; 梶原・藤井, 2001)。このように、堆積物底における埋性小型底生生物の分布の解析に極めて有効であった底質の粒径とそ

\* 2012年11月2日受領; 2013年6月12日受理

著作権: 日本海洋学会, 2013

† (独)水産総合研究センター 瀬戸内海区水産研究所

〒739-0452 広島県廿日市市丸石2-17-5

TEL: 0829-55-0666 FAX: 0829-54-1216

e-mail: naotok@affrc.go.jp

れに付随した物理指標が、堆積物の種類もしくは条件によって応用できない場合があり、粒径や粒度分布の適用の限界が明らかとなってきた。現在、これらの問題の多くを解決できるとされているのが堆積物底の硬度を測定し埋在性小型底生生物の潜砂、生息環境の指標とする手法である。このような手法は主に近年 10 年程度で急速に進歩し、多くの成果を上げている（阿久津ら, 1995；岩尾ら, 1996；梶原, 2001；佐々・渡部, 2006；佐々・渡部, 2007；梶原・高田, 2008；佐々ら, 2008；Sassa and Watabe, 2008；中山ら, 2009；佐々ら, 2009a；佐々ら, 2009b；Sassa and Watabe, 2009；梶原ら, 2010；佐々ら, 2010b；梁ら, 2011；Sassa *et al.*, 2011）。また、成果が出始めてから日があさいということもあり、今後多方面への展開や応用が期待できる分野でもある。しかし、これらの知見の多くが土木・工学分野に由来することもあって、自然科学系、とりわけ生態に携わる研究者への浸透はまだ進んでおらず、多くの場合正確な理解までには至っていないのが現状である。また、これらの知見の中には生物に対する理解が不足したまま考察されていると見受けられるものもあり、相互の分野に対する情報や理解の不足が、今後の進展に対する隘路として立ちだかる大きな課題となる可能性がある。本稿ではこのような現状を鑑み、底質硬度を測定・解析することにより主に埋在性小型底生生物の分布や生息環境を明らかにした事例を紹介するとともに、主な底質硬度の測定方法や底質硬度と関係の深い物理指標についても解説した。また、今後の底質硬度の測定・解析における発展性や応用、問題点や今後の課題についての考察も併せて行った。これらの知見とその理解を研究領域を超えて共有することで、底質への依存度が高い埋在性底生生物の分布と潜砂能力の関係をより普遍的に位置づける。また、生息場を含めた生態系の保全・管理へ応用・普及する基礎的知見として活用する体制の構築に資することを目的とする。さらに、今後の展開から、生息環境の指標として底質硬度の測定の次の段階を想定・検討することも試みた。

## 2. 底質硬度の測定器具・方法とその特徴

底質硬度の測定方法は、既存の測定器具を転用もしく



Fig. 1. Device for measuring penetration resistance with corn and spring.

は小改造（防水処理など）したもののから海底用に新規開発されたものまで種々の測定原理に基づくものが作られている。以下には、主に生物の生息環境として底質硬度を測定した記録のある機器について、測定原理毎に分類しながらその特徴について解説する。

### 2.1 貫入型機器

このタイプの測定機器は、コーン（金属製の円錐）を測定したい底質に貫入させてその貫入量を底質硬度の指標とするものが多い。貫入量を得るための機構として、コーン後部に装着されたバネの縮み量によるもの、コーンの自重で生じる貫入によるもの、コーン形状のデジタルセンサーなどさらにいくつかの原理に細分化できる。

#### 2.1.1 バネ式の貫入機器

生物の生息環境として底質硬度を測定した記録が多く、おそらく硬度の測定方法としてもっとも一般的に用いられていると考えられるタイプの測定器具である（阿久津ら, 1995；奥宮ら, 2001；水産庁・マリノフォーラム 21, 2007；上田ら, 2003；岩尾ら, 1996；上月ら, 2000）（Fig. 1）。多くは山中式土壤硬度計やそれに準ずる原理のもので、後部にバネのついたコーンを底質面に垂直に貫入させ、バネの縮み量から底質硬度の指標を得

るという測定法である。このタイプの機器のほとんどが農業用あるいは陸上における土木用での土壌環境を測定する目的で製作されたものであり、多くの場合そのまま水圏での測定に転用されている。小型・安価で操作が簡単なものも多いが、バネを使用する構造上あるいはコーンの自重が重いものもあって軟弱な底質、とりわけ小型の底生生物に重要と考えられる底表数 cm レベルの硬度を測定するのは原理的に難しい。ただし、岩尾ら (1996) が製作した器具のように測定範囲に合わせたバネや器具の選定を行うことで、軟弱な底質において良好な結果を得た事例もある。



Fig. 2. Penetrometer for Soft Soil.

### 2.1.2 自重式及び自由落下式の貫入機器

貫入型の機器としてはバネ式のものに次いで、底質硬度の測定に使用されている (辻本ら, 2007; 松井ら, 2011; 梶原・高田, 2008) (Fig. 2)。主にコーンの貫入量から底質硬度の指標を求める点においてはバネ式の貫入機器と同じであるが、貫入は自重によるか (自重式) 底表まで落下させることによるか (自由落下式) の違いがある。バネを使っていないため、一般的にバネ式の貫入機器に比べて相対的に軟弱な底質の測定に適している。また、コーン自体の角度や重量を調整することによって、さらに軟弱な底質での測定も可能となるが、貫入量に対する貫入抵抗値の変動が非線形に増大して行くので測定結果にばらつきが大きくなるというリスクを認識しておく必要がある。さらに、軟弱な底質に対応できるようにすればするほど、底表近くで異なる底質硬度の層が存在する場合に測定精度が著しく低下する。梶原ら (2010) は、泥底において原理が異なる複数の測定機での底質硬度測定を推奨しているが、それには上述のリスクを低減させる意味もある。

### 2.1.3 コーン形状のデジタルセンサー

市販のいわゆる「デジタルフォースゲージ (押したり引っ張ったりする力を測る測定器で、圧縮試験・引張試験に用いられる)」の先端計測部に小型のコーンを取り付けたものである (Fig. 3)。筆者が関わった事例を除くと、底質硬度の測定方法として用いられていることは

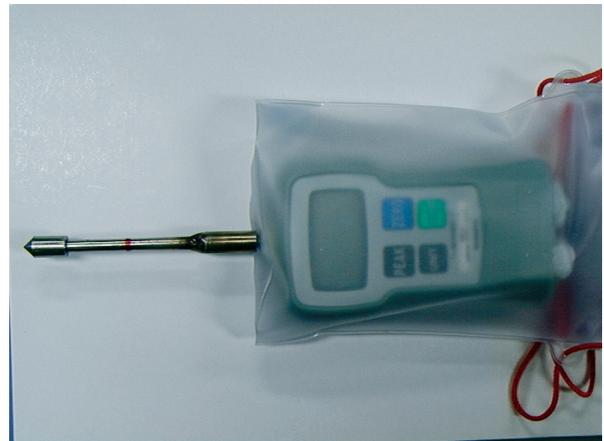


Fig. 3. Digital Force Gauge with waterproofing.

ほとんど無い (梶原ら, 2010; 梶原, 2001; 梶原・高田, 2008)。前述の 2 種とのもっとも大きな違いは、デジタルタイプのフォースセンサーで測定を行っていることと、貫入量から底質硬度の指標を算出するのではなく、底表から一定の深度まで貫入させた際、どれだけの力がかかるかを検出して硬度の指標としていることである。デジタルセンサーながら小型・軽量であり、測定精度・範囲ともに前 2 種に劣らない。特に軟弱な底質の測定に強く、陸棚域での採泥サンプルから泥底における生物生息環境として好適な底質硬度を測定・解析した実績もある (梶原, 2001)。ただし、高精度のセンサー故に非常に繊細であり、測定や取り扱いには習熟を要する。さらに、横



Fig. 4. Pocket Vane Tester.



Fig. 5. Torque measurement tool for bolting with vane.

方向の力も合力として加算して算出してしまふので、揺れる船上などでの測定には細心の注意が必要である。また、デジタル機器であるので基本的には耐水性はなく、丁寧な防水処理を施すことが不可欠である。

## 2.2 セン断型機器

このタイプの測定機器は、ベーンを底表から垂直に貫入させ、底表上を水平に回転させるように負荷をかけた後、底質がせん断した際の力を底質硬度の指標とするものである。室内実験用の設置機器と土質調査などでよく

使用される可搬式のものに大別され、広く使われている。測定値がベーンの直径と深さに大きく影響されるため、底表から迅速に硬度指標の変化を引き起こす砂浜海岸汀線域における測定に適している。ただし、本来の用途は土木工学的調査であるため、水圏の、とりわけ小型の潜砂性生物のスケールに合致する底表から数 cm レベルにおける微細な底質環境を測定可能なものは多くない。

### 2.2.1 セン断型機器（未改造）

先述のように、ベーンせん断抵抗の測定を目的として製作された機器の中には、水圏の底質環境の測定にそのまま転用できるものは多くない。オランダ Eijkelkamp 社製 Pocket vane tester (商品名) を用いた底質硬度の測定結果が報告されている程度である (梶原ら, 2010; 梶原・高田, 2008) (Fig. 4)。本機は小型軽量で堅牢な造りであり、ベーンユニットの交換によってある程度の測定範囲に対応することが可能である。しかし、水圏の底質環境の測定、とりわけ軟弱な泥質の硬度を確実に測定するためには、もう一段階大型のベーンユニットが必要である。

### 2.2.2 セン断型機器（改造）

水圏における底質硬度の測定結果としては、現在もっとも多くの知見が蓄積されている (梶原ら, 2010; 佐々・渡部, 2006; 佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2007; 佐々ら, 2008; Sassa and Watabe, 2008; 佐々ら, 2009a; 佐々ら, 2009b; Sassa and Watabe, 2009; 佐々ら, 2010a; 佐々ら, 2010b; 梁ら, 2011; Sassa *et al.*, 2011)。その測定器具の多くは、小型のねじを締める際に適性トルクを計測するトルクメーターの先端へ、十字型のベーンを取り付けたものである (Fig. 5)。これらのユニットを一括して商品としているものもあれば、トルクメーターを購入して別途ベーンを組み合わせて使用している場合もある。いずれの場合も測定部はトルクメーターであり、それをベーンせん断の計測に転用している。特徴としては、トルクメーターの容量とベーンの深さ・直径との組み合わせで、極めて広範な測定が可能となることである。また、量産品を転用した測定部を持ってい

るために、測定精度と比較してユニット全体のコストが低い。一方で、精度の良いデータを得るには、測定原理を理解した比較的習熟度の高い測定者が必要で、将来的な普及に対する大きな課題となっている。

### 3. 硬度測定による研究の変遷

十年以上前から底質硬度を底生生物の好適生息環境として捉えようとする試みはあるものの、報告は少数に限られていた（阿久津ら, 1995; 岩尾ら, 1996; 上月ら, 2000）。この時期の成果は、主に重要産業種の増養殖策の一環として行われているものが多い。阿久津ら（1995）は、造成されたアサリ増殖場において稚貝の発生量と底質硬度の間に一定の関係があることを明らかにした。岩尾ら（1996）は、トリガイのコンテナ養殖において、トリガイ漁場の底質を使用しても斃死してしまう原因の一つに底質環境が関係していると考え、コンテナに入れた種々の基質について貫入抵抗の一種である「締めり度」を測定した。その結果、締めり度をベースとしたコンテナ内の底質環境がトリガイ漁場に最も近かったのは粗粒・軽量のアンストラサイトを用いた場合であることを明らかにした。底質環境の再現を貫入抵抗の一種である「締めり度」で考察し、トリガイのコンテナ養殖を実用化している。また、これらの成果発表と同時期の1994年に当時の運輸省がエコポート政策を策定し、自然との共生を港湾政策として掲げたこと（運輸省港湾局, 1994）、1995年には日本において国際会議 ECOSET が開催されたことは、その後の研究の進展に少なからず影響を与えた。特に ECOSET95 は当時国際的には主流であったミチゲーション（mitigation: 開発事業による環境に対する影響を軽減するための保全行為や環境補償）を、概念から実践事例まで総合的に日本国内に紹介した。これにより、環境の補償・再生を様々な指標の測定と再現から模索するトレンドが発生した。このような時期を経て21世紀に入ると、底質硬度を底生生物の好適生息環境として捉え、分布を論じる手法が見られるようになり、研究成果としても散見されるようになった。同時期に干潟（奥宮ら, 2001）・陸棚域（梶原, 2001）等、異なるフィールドにおいて研究が取り組まれ、成果を上げはじめていることは興味深い。奥宮ら（2001）はポータ

ブルコーンを用いて底質硬度と生物との関係だけでなく、実験的手法を用いて生物による環境改変、いわゆるバイオターベーション（底生生物が堆積物中を上下に動き回ることにより、堆積層が乱れ、堆積物やその中の物質が鉛直的に移動すること）についても底質硬度を指標として考察しており、天然干潟と人工干潟の底質硬度による比較など多岐にわたる興味深い内容を示している。特に干潟においては、これ以降土木・工学分野が中心となって底生生物の生息環境を底質硬度などの物理的指標を用いて解析する事例が増加してゆくことになる。アサリなどの重要産業種を調査対象とする（中山ら, 2009; 佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2009a; Sassa *et al.*, 2011）意義の大きさや、国民の環境に対する関心・意識の高まりに伴う環境や生物多様性保全の場（水産庁・マリノフォーラム 21, 2007; 上田ら, 2003; 上月ら, 2000; 佐々・渡部, 2006; 佐々ら, 2008; Sassa and Watabe, 2008; 佐々ら, 2009b; Sassa and Watabe, 2009; 佐々ら, 2010b; 梁ら, 2011）さらには親水空間としてのアクセスの良さが調査を容易にする利点もあって、干潟は現在に至るまでもっとも多くの成果と知見を提供し続けている。今後干潟は、これらの研究成果や知見の蓄積を生かして、底質硬度や物理指標を底生生物の生息環境として解析してゆく研究分野の中核フィールドとして機能してゆくであろう。とりわけ、（独）港湾空港技術研究所を中心とした研究グループは、干潟のサクション（4章1参照）測定をメインに、底質硬度（ベーンせん断強度）や飽和度、相対密度を駆使して生物の種別・大きさ別の潜砂能力と対応させた極めて緻密なチャート（模式図）を構築しており（佐々・渡部, 2006; 佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2008; Sassa and Watabe, 2008; 佐々ら, 2009a; 佐々ら, 2009b; Sassa and Watabe, 2009; 佐々ら, 2010b; 梁ら, 2011; Sassa *et al.*, 2011）、今後の展開が大いに期待される。

一方で、底質の粒度分析が生物の生息環境として適用できない領域のうち、砂浜海岸汀線域においては研究そのものの遅れが指摘されるとともに（Brown and McLachlan, 2002）、特に底生生物の生態学的知見が本邦では少ない。能登半島西岸の砂浜海岸で行われた底生生物調査では（奥村ら, 2001）、砂浜海岸汀線域に典型的な少数種による高密度のマクロベントス群集形成

(McLachlan, 1983) が認められている。しかし、同時に底質の粒度組成や海底勾配はこれら帯状分布の成立を説明できるものではないことも明らかとなっていた (奥村ら, 2001)。このような中、砂浜海岸汀線域において高密度分布を示すことがあるヨコエビ類ナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* について、高密度分布している砂浜海岸汀線域の砂を用いた室内実験が行われた (梶原・高田, 2008)。この実験は、砂面と同一高さの水面から 1 cm ずつ水位を下げてゆき、それぞれの水位でナミノリソコエビの潜砂の可否とデジタルフォースゲージ (Fig. 3), Pocket vane tester (Fig. 4), 汚泥用硬度計 (Fig. 2) による 3 種の底質硬度指標を記録するものであった。その結果、砂面から水位が下がるにつれて 3 種の底質硬度指標の値は直線的に増大し、ナミノリソコエビの潜砂出来る個体数は少なくなっていった。最終的には砂面から 10 cm 下の水位でナミノリソコエビは 1 個体も潜砂することが出来なくなり、その底質硬度指標は汀線域において引き波により不飽和となった状態とほぼ一致した (梶原・高田, 2008)。また、砂浜海岸汀線域では飽和か不飽和かによって約 4~8 倍の底質硬度指標の変動が見られることも明らかとなり (4 章 3 参照)、潜砂性の底生生物にとって大きな環境勾配の一つと考えられた。これらのことから、汀線から岸に向かって水位が下がることにより底質硬度指標が増大し、ナミノリソコエビの潜砂を阻害するために帯状分布の上限が規定されていると考えられた。また、静水位 -10 cm において土砂は実質飽和状態にあって、地下水位とサクシジョンの 1 対 1 の線形関係が成立しており (佐々ら, 2007)、新潟県下の砂浜海岸におけるナミノリソコエビの分布ともよく一致していることが明らかとなっている (佐々ら, 2010a)。このように、ナミノリソコエビの帯状分布の岸側の上限は、サクシジョン上昇に連動した底質硬度によって統一的に説明できることが解明され、砂浜海岸汀線域における帯状分布の成立要因の一部が初めて合理的に示されることとなった。

底質が泥で構成されている場合、粒度分析が生物の生息環境として適用できないが、水深 100 m 付近の泥底については先述のようにマクロベントスの密度が泥底内でも大きく異なることが経験的に知られていた (林, 1984; 梶原・藤井, 2001)。ただし、このような陸棚域

では採取される底質が極めて軟弱な場合もあり、特にバネ式の貫入機器では測定できない状態も珍しくない。そこで、極めて高感度のデジタルフォースゲージに防水加工を施して陸棚域泥底の微小な底質硬度の測定とその解析が行われた (梶原, 2001)。その結果、底泥 5 cm 深の貫入に 1.5N 以上の力を必要とするエリアはマクロベントスの密度が極めて低いエリアとよく一致していることが明らかとなった (林, 1984; 梶原・藤井, 2001; 梶原, 2001)。また、この底泥 5 cm 深の貫入に 1.5N 以上の力を必要とするエリアは、泥底のみならず砂泥底でも計測される値であって (梶原, 2001)、泥底固有の値よりも高く硬いために、生息する埋性底生生物が限定され、密度が低くなるのではないかと考えられている (梶原, 2001)。新潟県の陸棚域では泥底におけるデジタルフォースゲージ, Pocket vane tester, 汚泥用硬度計による 3 種の底質硬度と一般的な物理指標との関係が調べられており (梶原ら, 2010)、デジタルフォースゲージ測定値と含水比, 実比重, 強熱減量との間に、Pocket vane tester 測定値と含泥率 (もしくは強熱減量) との間にそれぞれ有意な相関が見られた。これらの結果は、新潟県の陸棚域において、過去の調査で測定された底質の物理的性質から底質硬度をある程度推定することを可能とし、底生生物相や密度の長期変動を解析するうえで大きな役割を果たすと期待できる (梶原ら, 2010)。ただし、海域によって有機物の堆積などの状況が大きく異なっていると考えられるので (辻本ら, 2007; 梶原ら, 2010)、同一海域によるそれぞれのデータの蓄積が不可欠である。

#### 4. 底質硬度に関わる物理指標

底質硬度を測定・解析するにあたって、関連の深い物理指標がいくつか存在する。その中で代表的なものについて簡単に解説するとともに、底質硬度との関係性についても述べる。

##### 4.1 サクシジョン

サクシジョンとは、土質工学的には毛管水がその圧力差によって飽和水面以上に水を吸引する力、とされるが

(久野, 1966), もっともなじみ深いのはこれを常用対数として作物の根が利用できる水分の指標とした  $pF$  である (Schofield, 1935)。本稿では, 主に不飽和状態の地盤が吸水する力を圧力で示した値として用いられている。よって, 基本的には地盤が飽和状態の場合にはサクシオンは消失するか極くわずかなものとなる。(独) 港湾空港技術研究所を中心とした研究グループが, 底生生物の生息環境として扱う物理指標の主力である (佐々・渡部, 2006; 佐々・渡部, 2007; 佐々ら, 2008; Sassa and Watabe, 2008; 佐々ら, 2009a; 佐々ら, 2009b; Sassa and Watabe, 2009; 佐々ら, 2010b; 梁ら, 2011; Sassa *et al.*, 2011)。特徴としては極めて微細な測定が可能であり, 特に透水性が大で不飽和状態が出現しやすい砂浜海岸汀線域における調査に適している。底質硬度はサクシオンにして 2~4kPa 程度までの実質飽和領域で連動しているが, それ以上ではサクシオンの上昇に伴い底質硬度は減少する (佐々ら, 2010a)。サクシオンの測定には, 主にセラミック製のセンサーを用いるが, 前述の  $pF$  測定用のものはサクシオンの常用対数が測定レンジとなっており, 本稿のように微細なサクシオン (Pa~kPa) の観測が必要な目的には適さない。また,  $pF$  測定用のものはセンサーの深度が底表から 10 cm 以上のものが多く, 底表の物理環境を精査するのにも適さない。底質の物理指標, とりわけ底表を測定できるサクシオンメーターは現在では入手経路が限定され, 測定に習熟を要すること及び費用やメンテナンスの手間も相まって, 現場レベルでの新規導入は難しいと考えられる。ただ, これまでの調査・研究において重要な成果を多数輩出してきたのも事実であり, 代替の測定器具や測定法等について早急に検討し, 具体化する必要がある。

## 4.2 地下水位

本稿では地下水位を飽和水面と同義で使用することとする。いわゆる地下水面のことである。基本的にはこれより下層の堆積物の間隙は水によって飽和していることになるが, サクシオンの項で述べた毛管力の影響によって, 地下水位が下層に存在する状態でも飽和状態となることがある。サクシオンの項で述べた実質飽和状態にお

いては, サクシオンは地下水位とも 1 対 1 の線形関係が成り立つので (佐々ら, 2008), この場合, 底質硬度の上昇, サクシオンの上昇, 地下水位の低下は連動していることになる。実際にこの範囲とされる -10 cm までの静水位を実験的に設定すると, 水位の低下に伴って 3 種類の硬度指標は直線的に増加するという結果もある (梶原・高田, 2008)。測定法としては, 底質を垂直に掘り進み, 出現した水面と底表との差を計測するのが一般的である。ただし, 先述のように地下水位は, 底質の飽和・不飽和の境界やサクシオン 0 の境界とは必ずしも一致していないことに留意する必要がある。

## 4.3 飽和度

飽和度は, 底質を構成する 3 相 (固相・気相・液相) の体積のうち, 液相を気相と液相の総和で除して百分率で示したものである (松尾, 1984)。従って冠水時の底質あるいは地下水位以深の底質においては, 底質の間隙が液相のみ (水で飽和している) であって基本的に 100% を示す。つまり飽和度 100% はサクシオンが消失している状態であり, 砂質土では底質硬度が低位安定する状態であるともいえる。ただし, 底質硬度の傾向とは異なり, 飽和状態や乾燥状態を除く広い範囲でほぼ一様にサクシオンの上昇と飽和度の低下は連動している (佐々ら, 2010a)。飽和度を測定するには現場の土砂を乱さずに採取するという土木・工学的な技術が必須であって, 習熟を要する。さらに, 採取した土砂を研究室において専用の解析装置で処理するのが主流であり, 基本的に現場でこの値を知ることは出来ない。また, 解析するための機材などのコストも高い。ただ, 塩分を含む水環境下では原理上昨今の TDR 水分計は使用できないため, 含水比とともに海水の不飽和域において底質の水分量の目安を得ることが出来る数少ない指標として有用である。

## 4.4 粘着力

泥底の場合, その底質は主に粘性土で構成されている。粘性土はその粒子の小ささ故に粒子間に界面物理化学的な力が加わり, 砂質土には見られない粘着力を有するとされている (松尾, 1984)。砂質土では不飽和状態にお

いてメニスカスによる見かけの粘着力が現れる（松尾，1984）。このことは砂浜海岸汀線域における飽和によるサクシジョンの消失と底質硬度の低位安定や（佐々ら，2010a），陸棚域泥底における底質硬度の多様さによく現れていると考えられる（梶原ら，2010；梶原，2001）。つまり冠水した環境ではサクシジョンが消失することにより砂底については見かけの粘着力も消失するため，その結果底質硬度の変動自体も小さくなりその重要度は汀線域に比べ低いと考えられるが，粘着力を有する泥質主体で構成される底質ではその硬度が冠水時にも維持されるので，埋存する生息環境に関するほぼ唯一の物理指標として活用が可能といえる。したがって，現時点では冠水時における泥質の硬度指標は，その粘着力とほぼ同義と解釈することが出来る。ただし，実際の底泥は層状の堆積をしていることもあり，その判断はせん断抵抗と貫入抵抗の併用など，複数の原理による硬度指標の測定結果に基づくことが望ましい。

## 5. 今後の展開と課題

干潟において，底質硬度やサクシジョンの生息環境としての重要性はさらに高まると考えられる。一方で，干潟には少なからず潮位の干満差が存在するため，同じ場所においても冠水した環境ではサクシジョンは消失してしまう。その反面，干潟でのこのような調査はほとんどが干出時にのみ行われており，冠水時に潜砂や営巣を行う生物の好適な底質環境を反映しているかどうかは検証の余地があるように思える。冠水時の砂底については底質硬度の変動自体も小さくなるため潜砂や営巣にはむしろ，各々の生物の能力の範囲と物理量としての砂粒の大きさ，つまり粒径との関係で解析できるが（梶原，1999），上述のように粘着力を有する泥質主体で構成される底質では，冠水時においてはその硬度が埋存する生息環境に関するほぼ唯一の物理指標である。しかし，冠水時における泥質主体の底質に対する測定では，測定値がこれまでより相当小さくなることが考えられ，現状の測定法の測定範囲では有効な測定値を検出できない可能性もある。このような情勢から今後の課題の一つとして，常時冠水している泥質主体の底質硬度を測定する手法の確立が挙げられる。そのためにはまず，既存の測定機器及び測定

法に関する流用の可能性の有無，測定機器本体以外の付属ユニットの改造もしくは新設による軽度の改良を踏まえた応用の可能性，測定機器本体もモジュールの一つと見なした大規模な改良（測定法のみ共通している状態），新たな測定機器の選定（この場合は既存の測定法との測定データの整合性を検証する必要あり）の順に取り組み，できる限り現用の測定機と手法を生かしつつ確立する必要がある。

冠水時における泥質主体の底質硬度を測定する方法の確立と併せて，今後の重要な課題と考えられるのが対象生物と硬度の測定深度とのスケールの一致である。例えば湖沼ではシジミ類の好適漁場と底泥の硬度に一定の関連が認められ，底質の硬度の変化から漁場の底泥を耕耘する間隔を取り決めるなどの対策がマニュアル化されている（水産庁，2009）。シジミ漁場における底質硬度を直接測定した結果，ある一定の硬度以上ではシジミ漁場として不適であると考えられている（水産庁，2009）。しかし，海底耕耘を行って底質硬度を低下させてもシジミの放流効果に差が認められない場合がある（水産庁，2009）。これには種々の要因が考えられるが，測定した底質硬度と対象としたシジミ類の生息深度のスケールの不一致について検証する必要がある。ここではシジミの密度が高い親貝保護区の底質硬度が約  $20\text{kg}/\text{cm}^2$ ，シジミの密度が低い未利用漁場区の底質硬度が約  $40\text{kg}/\text{cm}^2$  となっているが，いずれの値も相当に高い硬度であり，シジミの生息している底表数 cm 深の硬度を示しているとは考えられない。特に好適生息環境をこの硬度の差が直接示しているとは考えにくい。この場合においては相当に深い底質硬度を測っているか，船上から直接測定する方法によって測定値が過大に検出されている可能性が考えられる。前者の場合，シジミ類の生息深度のスケールを超えた深度の硬度を測定することによって，本来生息深度で認められる可能性がある底表硬度の差をマスキングしていることが疑われる。後者については，底質の硬度を直接測定する際に水面上から測定器具を投入するために，貫入する際に過剰な力が働き，それを併せて底質硬度として検出していることが疑われる。シジミ類，とりわけ放流稚貝のような小型個体の場合，さらには放流漁場が泥質主体で構成される場合，底質のなかでも底表硬度は極めて重要な生息環境であると考えられ，これ

らを把握するための早急な対応が不可欠である。なかでも、泥底の冠水環境下において船上から底表硬度を直接測定した例はなく、最も重要であると考えられるが、船上における揺れの範囲が底表の測定深を超えると想定されることから、測定器具・手法の確立には相当な困難が予想される。この実現のためには従来の発想を大きく転換した新たなロジックに基づく底質硬度の測定方法が不可欠である。

砂浜海岸の汀線域においては、砂面が飽和状態から不飽和状態に移行するに伴い底質硬度が増大して上昇し、生物の潜砂が阻害されている例が紹介されたが（梶原・高田，2008；佐々ら，2010a），さらに上部のゾーンでは底質の硬度とサクシジョンの増大が一致していないにもかかわらず、帯状分布のピークと上端をサクシジョンで統一的に示すことが可能となっており（佐々ら，2010a），サクシジョンと連動した生物に対する作用機序がまだ複数存在することを示唆している。これらを早急に明らかにし、汀線から潮上帯までの物理指標に裏付けられた生物への作用機序、ひいては帯状分布の成立要因を明らかにする必要がある。新潟県の砂浜海岸における底質硬度のピークは、サクシジョンが2~4kPaの範囲に存在する（佐々ら，2010a）。汀線から岸に向けてサクシジョンと連動して底質硬度が増大し、ナミノリソコエビの潜砂を阻害して帯状分布の上限を規定していることは先述の通りである。さらに岸側でサクシジョンが2~4kPaに存在する底質硬度のピークに達し、それより岸側ではサクシジョンの上昇に連動して底質硬度が減少していく（佐々ら，2010a）。このエリアで帯状分布を示す生物について、汀線側に増大してゆく（岸側に減少していく）底質硬度が帯状分布の下限として機能している可能性についても、積極的に検討する必要がある。これに関連し、砂浜海岸汀線域における底質硬度の測定において、砂浜の飽和・不飽和の区別を明確に行っておく必要がある。先述のように冠水時の砂底については、底質硬度の変動自体も小さくなるため潜砂や営巣にはむしろ、各々の生物の能力の範囲と物理量としての砂粒の大きさ、つまり粒径との関係で解析できる（梶原，1999）。また、サクシジョンが消失した飽和水面以下でも帯状分布が認められていることから（奥村ら，2001），漂砂の挙動などよりその場で傾度の高い物理環境に着目し、底質硬度とは異なる物理

指標の検討を行うべきである。環境要因の一つとして砂浜海岸の貫入性を取り上げていながら（Brown and McLachlan, 2002），帯状分布の成立要因ともなる重要性を看破できていない理由は、砂浜海岸の飽和・不飽和の差が底質硬度の測定値及び底生生物の生息環境としての意義を激変させるという認識を欠くことに尽きる。また、干潟でも同様であるが砂浜海岸では、底質硬度を潜砂の可否に対応させるか、営巣の可否に対応させるか、底質硬度がその指標として適しているのかについて物理学的な根拠に基づく整理と使い分けが必要な時期に来ている。そういう意味では上述の情勢を含め、底質硬度も他の底生生物の生息環境としての物理指標と同じく、適用の限界が明らかとなってきたともいえる。

これまで述べてきたように、底質硬度は主に潜砂性底生生物の生息の可否を判断する指標として利用されており、他の環境要因との関連性を述べた知見は少ない。現状では、主に泥底における底質硬度と、底生生物の餌料となり得る有機物量との関係についての知見がある。上田ら（2003）は、吉野川河口の干潟において山中式土壌硬度計で測定した貫入抵抗値を各種環境指標と比較した。その結果、貫入抵抗値はシルト・クレイ率、含水率、最潮時水位からの比高といった物理的な指標だけでなく、強熱減量、全有機炭素、全窒素の有機物量の目安となる化学的指標とも有意な相関があることを明らかにした。新潟県の陸棚域では、泥底におけるデジタルフォースゲージ測定値と強熱減量との間に、Pocket vane tester 測定値と含泥率（もしくは強熱減量）との間にそれぞれ有意な相関が見られた（梶原ら，2010）。また、表層5mmのごく浅い層を測定するPocket vane testerでは、通常含水比と底泥の底質硬度との間に認められる相関が見られなかった。これは、底泥の物理的性質というよりも底表に堆積した有機物の物理的性質を測定していることに起因すると考察されている（梶原ら，2010）。これらの結果は、いずれも底質硬度の減少と強熱減量等有機物量の増大が関連づけられており、有機物の底表への堆積を硬度指標からも推定できることを示している。とりわけ、底生生物の中でも堆積物食者に関しては、硬度指標から生息環境だけでなく餌料環境も解析できる可能性があり、今後の発展と展開が期待される。

底生生物が潜砂や営巣のために有している能力と、底

質の状態とのマッチングの解明は、その生息環境を解析するうえで極めて単純・明快ながら説得力のある手法である。このような手法の代表的なものとして、底質硬度の測定と関連する知見及び情勢について様々な角度から取り上げた。今後も、底質硬度の測定を通じて底生生物の生息環境の解明に努めるとともに、底生生物の生息環境に関わる新たな物理指標の探求にも邁進してゆく必要がある。

## References

- 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**, 22-30.
- 東幹夫・把野義博・把野裕子 (1985) : 平戸島志々伎湾の底生動物群集—II ヨコエビ類と堆積型による生息場所分析。日本ベントス研究会誌 **28**, 1-11.
- Biernbaum, C. K. (1979) : Influence of sedimentary factors on the distribution of benthic amphipods of Fishers Island Sound, Connecticut. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, **38**, 201-223.
- Brown, A. C. and McLachlan A. (2002) : 砂浜海岸の生態学。須田有輔・早川康博訳, 東海大学出版会, 東京, 427pp.
- Gray, J. S. (1974) : Animal-sediment relationships. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **12**, 223-261.
- 林 勇夫 (1984) : II-1-4 新潟北部沿岸のマクロベントス。海洋生物資源の生産能力と海洋環境に関する研究北陸地域調査成果報告, 水産庁日本海区水産研究所, 115-120.
- 岩尾敦志・西広富夫・藤原正夢 (1996) : トリガイ養殖に関する研究—II—トリガイ養殖器内に敷く基質について—。京都府立海洋センター研究報告, **18**, 57-61.
- 梶原直人 (1999) : スガメソコエビ科ヨコエビ類の棲管作成能力に関する研究。水産工学, **35**, 223-227.
- 梶原直人 (2001) : デジタルフォースゲージを用いた新潟県沿岸域における海底泥の硬度測定結果について。水産工学, **38**, 179-184.
- 梶原直人・藤井徹生 (2001) : マガレイ成育場の評価手法の開発。平成11年度沿岸漁場整備開発調査(直轄)報告書, 水産庁漁港漁場整備部計画課, 137-142.
- 梶原直人・高田宜武 (2008) : ナミノリソコエビ *Haustorioides japonicus* (端脚目: ナミノリソコエビ科) の潜砂行動に及ぼす、飽和水位の影響に関する実験的研究。水産工学, **45**, 151-156.
- 梶原直人・井関智明・高田宜武・藤井徹生 (2010) : 新潟県下越陸棚域海底における泥底及び砂底の底質硬度と物性指標の関係。水産工学 **47**, 63-68.
- 上月康則・倉田健悟・村上仁士・鎌田磨人・上田薫利・福崎亮 (2000) : スナガニ類の生息場からみた吉野川汽水域干潟・ワンドの環境評価。海岸工学論文集, **47**, 1116-1120.
- 久野五郎 (1966) : 解説土質工学。理工図書, 195pp.
- McLachlan, A. (1983) : Sandy beach ecology—a review. *Sandy beach as Ecosystem*, The Hague, Boston, p.321-380.
- 松井章弘・土田孝・川崎大輔・森森美 (2011) : 軽量動的コーン貫入試験を用いた干潟地盤の調査。地盤と建設, **28**, 55-62.
- 松尾新一郎 (1984) : 新稿土質工学。山海堂, 253pp.
- 中山威尉・福田裕毅・秦安史・阿部英治・櫻井泉 (2009) : 底質の貫入抵抗がアサリの潜砂行動に及ぼす影響。水産工学, **46**, 29-36.
- 奥宮英治・桑江朝比呂・萩本幸将・小沼晋・三好英一・野村宗弘・中村由行 (2001) : 干潟底泥の強度特性と環境要因との関係—コーン貫入試験を用いた調査—。港湾空港技術研究所資料, **1002**, 22pp.
- 奥村卓二・梶原直人・長澤トシ子 (2001) : 福井県浜地から石川県千里浜の砂浜海岸におけるマクロ及びメガベントスの分布。日本海区水産研究所研究報告, **51**, 133-140.
- Rhoads, D. C. (1974) : Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **12**, 263-300.
- Sanders, H. L. (1958) : Benthic studies in Buzzards Bay. I. Animal-sediment relationships. *Limnol. Oceanogr.*, **3**, 245-258.
- 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**, 1061-1065.
- 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.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2008) : Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubblercrab, *Scopimera globosa*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **354**, 191-199.
- 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**, 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**, 1226-1230.
- Sassa, S. and Y. Watabe (2009) : Ecological Geotechnics: Performance of benthos activities controlled by suction, voids and shear strength in tidal flat soils. *Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Egypt*, 316-319.
- 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**, No. 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**, 1096-1100.
- Sassa, S., Y. Watabe, S. Yang, and T. Kuwae (2011) : Burrowing Criteria and Burrowing Mode Adjustment in Bivalves to Varying Geoenvironmental Conditions in Intertidal Flats and Beaches. *PLoS ONE*, **6**;e25041,doi:10.1371/journal.pone.0025041.
- Schofield, R. K. (1935) : The *pF* of the water in soil. *Trans. Intern. Cong. Soil Sci.*, **2**, 37-48.
- 水産庁 (2009) : 湖沼の漁場改善技術ガイドライン。191pp.
- 水産庁・マリノフォーラム 21 (2007) : 砂質系干潟の健全度評価手法マニュアル。29pp.
- 辻本良・浦邊清治・小谷口正樹 (2007) : 富山湾の漁場環境 (2006) —水質・底質・藻場・餌料環境—。平成18年度富山湾漁場環境総合調査報告, 富山県水産試験場, 204pp.
- 上田薫利・上月康則・倉田健悟・大谷壮介・桂義教・東和之・堅田哲司・村上仁士 (2003) : 貫入抵抗値を用いた簡便的な干潟底生生物調査地点の選定手法に関する基礎的研究。海岸工学論文集, **50**, 1056-1060.

運輸省港湾局（1994）：環境と共生する港湾エコポート＜新たな港湾環境政策＞．大蔵省印刷局，87pp.

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**, 986-990.

## Hardness of marine bottom sediment as a good proxy for habitat of benthic animal

Naoto Kajihara<sup>†</sup>

### Abstract

Characteristics of the bottom sediments are important factors to burrowing benthic animals. However, particle size and deposition pattern of bottom sediments, the typical indices of the bottom sediments, had been hardly applicable to the analysis of their habitat in the muddy bottom area and shoreline of sandy beach. In recent years, hardness index, a good proxy for the evaluation of the sediment characteristics, has been developed and the successful results have been reported. The purpose of this article is to introduce the methods of measurement for hardness indices at bottom sediments and the relevant physical property indices, including suction, saturation level, saturation percentage and cohesion, and to provide better understanding basic principles behind them. Finally, future development of the research by utilizing hardness indices and the possible new indices to evaluate habitat are examined.

**Key words:** Hardness, Suction, Benthic Animal, Muddy Bottom, Shoreline

(Corresponding author's e-mail address: naotok@affrc.go.jp)

(Received 2 November 2012; accepted 12 June 2013)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2013)

---

<sup>†</sup> National Research Institute of Fisheries and Environment of Inland Sea, Maruishi 2-17-5,  
Hatsukaichi Hiroshima, 739-0452, Japan. Tel : 0829-55-0666, Fax : 0829-54-1216