

砂浜生物のハビタートシミュレーション

酒井哲郎*・後藤仁志**・沖 和哉***・中村隆志****

1. 緒 言

沿岸域の生態系とりわけ底質の特性との関連の深い底生生態系を対象としたモデルの開発は端緒についたばかりであり、特に具体的な種を対象とした検討はあまり例がない。生態系は、極めて多くの構成要素が複雑に関連したシステムであることから、通常、微生物や栄養塩を状態変数とした議論が行われることが多く、特定の種の個体数の増減が直接的に論じられることは希である。これに対して、河川流域では、水理量と特定の魚種の個体数との相関関係を大規模な生態調査により把握して、流域開発の影響による個体数の変化を予測しようとする試みが盛んになりつつある。この試みは、PHABSIM (Physical HABitat SIMulation method) と呼ばれ、具体的には、流れ系のシミュレーション (hydraulic simulation) と生息環境系のシミュレーション (habitat simulation) を包含するコンピュータプログラム群を意味している。

本研究では、まず、PHABSIM の概要を述べ、次に、PHABSIM を沿岸域の底生生物に適用するために底生生態の生息環境要素としての漂砂系の役割を考察し、漂砂系に重点を置いた PHABSIM のフレームワークを実施するとともに、時化の前後の二枚貝の減耗を例にして具体的な解析を試みる。

2. PHABSIM の現状

人為的にコントロールされた流れ場が生物の生息環境として適切であるかについての評価の試みは、現在のところ主として河川を対象に進行している。具体的には、ダムの建設や河川改修が水辺の生物の生息環境 (habitat) にどのような影響を与えるのかを知るため、IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) のフレームワークが US Fish and Wildlife Service により提案されて以来、河川生物の生息環境アセスメントの手法として様々な試みが行われている。

Bovee (1982) は、IFIM の概念を次の 7 つのステップに分けて説明している。具体的な補足説明を加えつつ、その要点をまとめると以下ようになる。(1) 河川の現況 (水質、流路形状、流況など) を把握する。(2) 個々の種の生息環境の選好性 (habitat preference) を表現するための数学モデルを構築する。具体的に言うところ『どの魚種がどの流速を好むか』といった問題がこの段階である。(3) 現在の流れ系を記述する数学モデルを決める。具体的に言うところマクロな水理量 (例えば流量) と局所的な流況 (例えば流速分布) の関連を評価するのがこの段階であり、言い換えると流れの数値シミュレーションがこれに相当する。(4) いくつかのマクロな水理量 (例えば流量、地形条件など) を変化させて、(2)、(3) の数学モデルを用いることにより、個々の環境変化の下での対象生物種の生息環境についての評価を行う。(5) プロセス (4) でシステムに不都合 (生息環境の激変) が生じた場合、システム改善の代替案を検討する。(6) 許容可能な最低水準の解が得られるまで、プロセス (3)、(4)、(5) を繰り返す。(7) 得られた代替案 (解) を (社会、経済的要因も含む) より広範な見地から検討し、アセスメントを行う。

PHABSIM は、IFIM の概念を具体化するためのコンピュータプログラム群の呼称である。PHABSIM は、1978 年に初めて試みられ、以来様々な改良が加えられてきた。先に述べた IFIM の 7 段階のプロセスからも分かるように、PHABSIM を構成するサブシステムは、流れ場のシミュレーションと生息環境のシミュレーションの 2 つである。初期の PHABSIM における流れ場のシミュレーションは、ハイドログラフを与えて 1 次元不等流計算により局所的流況を予測するといった簡単なものであったが、近年、平面 2 次元の浅水流解析なども用いられつつある (例えば、Boudreau et al.; 1996)。

これに対して、生息環境のシミュレーションには、これと言った決め手がなく、初期の PHABSIM 以来一貫して対象水域の生態調査による生物種別の選好曲線 (preference curve; 水理量と生物の個体数の間の相関関係を示す曲線) を決定する方法がとられている。この方法の難点は、調査に費用と時間を要する点であり、特

* 正会員 工博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻

** 正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻

**** 正会員 栗本鐵工所

定の調査区域を対象とした選好曲線にどの程度の普遍性が期待できるかと言った本質的な問題も未解決である。はじめに述べたように、ハビタートシミュレーションが河川を対象に多数実施されているのも、比較的狭い範囲に調査区域を設定できるため海洋と比較した場合に調査が容易であることに起因するところが大きいものと推測できる。

このように、PHABSIMの基本的構成要素である流れ場のシミュレーションと生息環境のシミュレーションには精度面で大きな差があり、生息環境のシミュレーションを如何に改善して、信頼性と普遍性を確保するかが、PHABSIMの全体の信頼性を大きく左右することは明白である。

3. 移動床系への PHABSIM の適用

3.1 移動床系の PHABSIM の構成

自然の水域の多くが砂礫床上にあることを考えると、生息環境要素としての砂礫の役割の重要性が浮上してくる。既存の PHABSIM においても、底質の条件(礫, 砂, シルトなど)が生息環境を考える上での重要な要素として取り上げられているものも見られるが(例えば, Boudreau et al.; 1996), 移動床における流れと土砂との相互作用とそれに起因する地形変化までを考慮した PHABSIM は実施されるには至っていない。PHABSIM は極最近まで、流況の定量的予測の重要性を認識した比較的進歩的な生態学者のグループにより推進されてきたため、水工水理学の研究成果が必ずしも十分に反映されているとは言い難い面も見られる。

ところで、移動床の本質は、流れ系(波動場)、流砂系(漂砂系)、地形変化系の3者が相互作用系を構成する点にあり、言い換えると、移動床は底質の条件も流況次第で容易に変化すると言ったような不安定性を内在していることとなる。

さらに、生態系を含めて考えると、移動床系を構成する3つの系が個々に生態系を取り巻く周辺環境(生物の

生息環境要素)となっている。この関係を模式的に示したのが図-1である。まず流れ系は、流量、流速等の流況を通じて habitat の構成に関わり、流砂系は、巨礫、礫、砂、シルトといった底質の特性を通じて、また、地形変化系は、瀬と淵の配置など流路形態を通じて habitat を構成している。

底質の運動を念頭に置きつつ PHABSIM の構成を再考すると、2つのサブシステムは移動床系のシミュレーションと生息環境のシミュレーションとなるが、先にも述べたように、移動床のメカニズムの研究とそのモデル化が先行している状況にあり、生態系の応答のモデルに比べると habitat 自体の評価はかなりの精度で可能である。なお、ここで言う生息環境のシミュレーションとは、所与の環境条件に対する生態系(Ecosystem)の応答の解析(選好曲線を求めること)を意味しており、物理的環境予測は移動床系のシミュレーションで取り扱われるものとする。

このように habitat が評価された後の生態系の応答がシミュレーションの成否を決する重要な段階である点は、従来の PHABSIM と移動床系を念頭に置いた PHABSIM とに共通している。

3.2 Habitat Simulation のブラックボックス的側面

現状では、生息環境のシミュレーションは、現地調査により局所水理量と対象種の選好性の相関関係を調べて選好曲線にまとめるだけのプロセスに過ぎず、生態系自体のメカニズム(内部機構)を問わないブラックボックス的アプローチとなっている。PHABSIM の発展には、このブラックボックスの中身を明らかにすることが不可欠であることは言うまでもないが、生態系が極めて複雑な相互作用系である事実を考えると、容易なことではない。しかし、メカニズムを想定し易い物理系が支配的な場合の Ecosystem に限定すれば、従来型のブラックボックス的アプローチとは異なる PHABSIM の姿を示すことも不可能ではない。

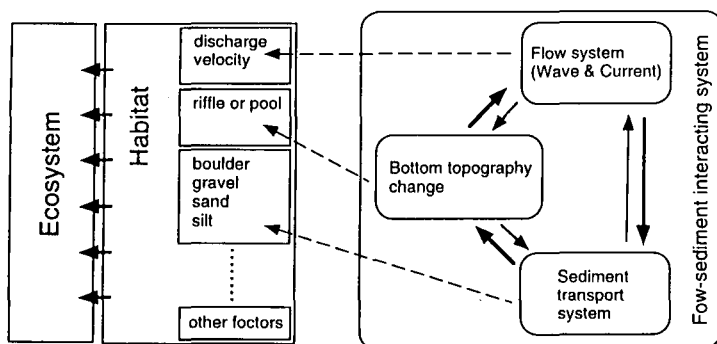


図-1 移動床系の PHABSIM の構成

4. 二枚貝の PHABSIM

4.1 二枚貝の PHABSIM の位置付け

沿岸域に目を向けると、従来型の生息環境のシミュレーションすなわち選好曲線の推定でさえ困難な状況にある。先にも述べたように、選好曲線の決定にはある程度閉じた系での網羅的な現地調査が欠かせないが、沿岸域の魚類などの生物は行動範囲が広く、個体のサンプリングには多大の費用と労力を要し、調査の実行は困難である。

沿岸域でも比較的行動範囲の狭い底生生物とりわけ水産資源としての価値を有する貝類に関しては、調査・研究が行われており、貝類自体の生態に関しても現地調査や室内実験が試みられている。中村・三村ら (1990) は、資源動態方程式と漂砂モデルを援用した稚貝の岸沖輸送モデルを用いて漁場の形成機構に関して検討している。また、最近、三村・鯉渕ら (1996) は、沿岸域における物理環境の支配要素を抽出し、それらとホッキガイの生息域の関係を個別に考察することにより好適生息条件を抽出する試みを行っている。三村らの論文では PHABSIM については言及されていないものの、アプローチは PHABSIM と同様の範疇に属し、この意味で沿岸域における PHABSIM の先駆的適用例として位置付けられる。

さらに、二枚貝の生態に関しても基礎的研究が行われている。例えば、桑原・日向野 (1993) は、漂砂の掃流モードで用いられる滑動の運動方程式を援用して二枚貝の岸沖移動の追跡を試み、現地条件での試算を行っている。山下・和田ら (1995) は、振動流装置を用いた二枚貝の移動過程の実験を試みている。二枚貝の初期移動に相当する潜砂中の二枚貝の浮上機構に関しては、混合粒径の分級機構と同様の逆グレイディング現象の関与を粒状体シミュレーションで示した後藤・酒井ら (1995) の研究や波浪による海底地盤の液状化の関与を示した山下・南村ら (1995) の実験がある。

以上のように、砂地に生息する貝類は、魚類等と比べると活動範囲も限定されているため現地での個体数の調査例も見られ、さらに、移動床系の特性に着目した PHABSIM の対象としても適切である。

4.2 二枚貝の PHABSIM の構成

比較的静穏な場における二枚貝の挙動を考える上では貝自体の能動的運動（いわゆる潜砂運動）が重要ではあるが、潜砂運動の能力には個体差が存在し、簡便な取扱は必ずしも容易ではない。本研究では、経験的選好曲線に依存しない移動床系における PHABSIM の手始めとして、選好曲線を求めるプロセスに相当する Ecosystem の応答モデルを簡潔化するため、二枚貝自体の能動的な運動能力を遙かに凌駕する外力の作用を想定する。

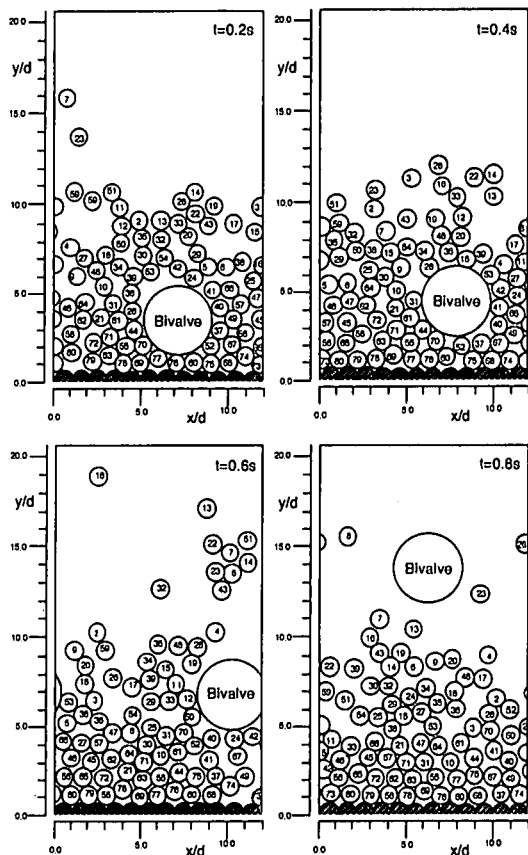


図-2 個別要素法による二枚貝の浮上過程の再現

また、生物の個体数の変動には、長い時間スケールの穏やかな変動と短い時間スケールの急激な変動が存在し、一般的に、前者が水質的（あるいは生物化学的）要因の影響を強く受けるのに対して、後者は水理的（あるいは物理的）要因に強く規定される。特に、水質の問題を生態系から論じるには、微生物の摂食を含む活動に伴う相互作用を考慮した複雑系を解析する必要が生じ、モデルには多くの経験的要素が含まれるために困難を伴う。本研究では、物理的要因に強く影響される短時間の急激な個体数の変動を対象とする。

すなわち、本研究では上記の条件を満足する場として、時化の際の砂地の二枚貝の生存条件についての PHABSIM を試みた。この場合、(1) 波の場および Shields 数（底面せん断力）の評価、(2) 所与の Shields 数の下での砂地中の貝の挙動の 2 段階の検討が必要となるが、(2) のプロセスについては、逆グレイディングを想定した後藤・酒井ら (1995) の数値解析結果を用いることとした。波浪場は、非定常緩勾配方程式（渡辺・丸山, 1984）を用いて計算し、摩擦抵抗係数（田中・Thu, 1993）により波動境界層外縁流速から Shields 数を評価した。

一方、二枚貝の挙動に関しては、二枚貝と周囲の砂粒

子をシリンダーでモデル化した個別要素法によりシートフロー状に流動化した砂層中の二枚貝の浮上過程を追跡した後藤・酒井ら（1994）のモデルを援用して評価した。解析結果の例を図-2に示す。まず、Shields数の変化に対する流動層厚の変化を個別要素法により系統的に検討し、次に、二枚貝の初期潜砂位置が流動層に含まれるか否かによって逆グレイディングによる砂層からの二枚貝

の洗い出しの発生を判定した。一連の検討を通じて、二枚貝の浮上限界 Shields 数が決まり、波動場の解析から求められた Shields 数の空間分布から、時化の際の砂層からの二枚貝の洗い出しの発生位置（すなわち生存不可能領域）の空間分布が求められる。

4.3 二枚貝の PHABSIM の適用結果

早瀬・宮本（1985）により実施された石狩湾新港東防波堤沖を対象に時化の前後での個体数変動の調査について、PHABSIM の適用を試みる。早瀬らは、1984 年 10 月 9 日と 11 月 30 日にホッキガイの個体数の調査を実施したが、その間の 10 月 28 日には最大波高 6.8 m、周期 8.6 秒、波向 NNW~NW の時化が観測されている。現地の底質は細砂に分類され、平均粒径 $d=0.17$ mm（一部水深の浅い地点では、0.21 mm）であり、調査対象とされた稚貝の平均殻長は $d_s=5.7$ mm 程度であると報告されている。

図-3 は、個別要素法により求められた Shields 数の変化に対する流動層厚（saltation 層厚と sheetflow 層厚の和）の変化を示している。早瀬らの調査の条件では、平均殻長・平均粒径比 $d_s/d=33.5$ （ $d=0.17$ mm とした場合

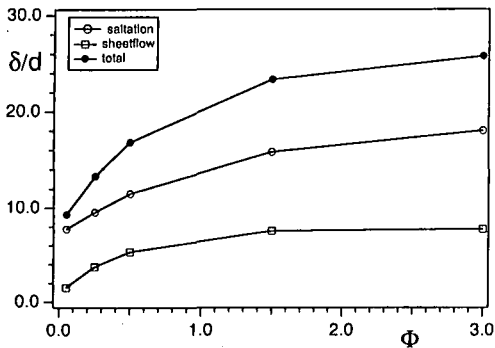


図-3 Shields数の変化と流動層厚の関係

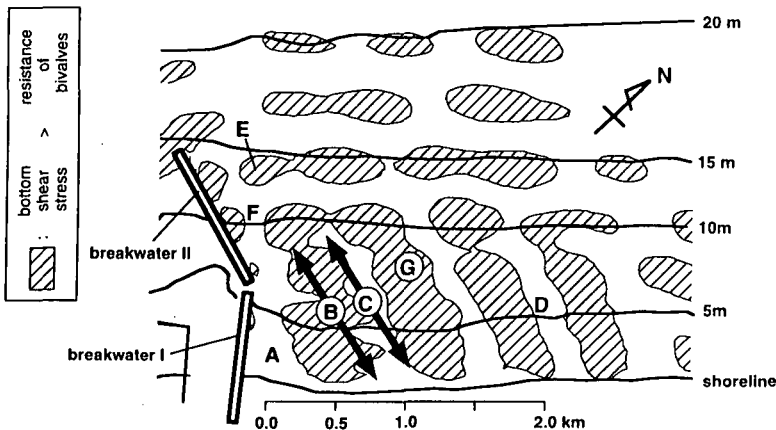


図-4 PHABSIMによる二枚貝の生存可能領域の推定結果

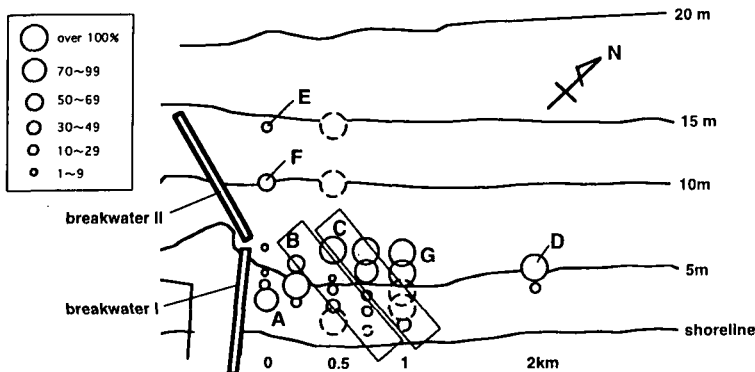


図-5 現地調査による生残率の分布

合)であり、流動層厚が殻長の70%程度になる Shields 数を逆算すると $\phi=1.5$ となる。これを二枚貝の生存限界として、波浪場の解析結果から評価した Shields 数の空間分布から、調査対象とされた時化における二枚貝の生存可能領域を求めたのが、図-4である。一方、図-5は、早瀬らの調査から算定された時化後の生残率の分布を明示したものである。図中には、生残率が6段階の大小の円で示されており、円の中心がサンプリング位置を表している。なお、時化以前のサンプリングにおいて個体数が僅少であった測点に関しては、他の測点との信頼性の違いを示すため破線で表示することとした。

まず、防波堤 I の前面 5 m 以浅には高生残率領域(図中に A と表示)が見られるが、PHABSIM でもこの領域は砂層中の貝の洗い出しが発生しない領域に対応している。次に特徴的なのは、防波堤 I 前面の高生残率領域 A と隣接して低生残率領域 B が左斜め(防波堤 II とほぼ平行な方向)に存在し、それに隣接して高生残率領域 C が存在するというように、生残率の高低が繰り返されることである。このような縞状の高低生残率領域の反復は、PHABSIM の結果にも明瞭に現れており、縞の方向も防波堤 II に沿った向きとなっている。2 km の測線上の水深 5 m 地点(図中の D)では高生残率となっているが、この地点は PHABSIM でも貝の洗い出しの非発生領域となっており良好な対応を示している。また、0 km 測線上の水深 15 m 地点(図中の E)では低生残率、逆に水深 10 m 地点(図中の F)では高生残率となっているが、PHABSIM の結果でも水深 15 m 地点が洗い出しの発生領域、水深 10 m 地点が非発生領域に属しており、対応は良好である。ただし、1.0 km 測線上の水深 10 m 付近では、調査結果から求められる生残率と PHABSIM の結果が逆の傾向を示しており、必ずしも全領域で完全な対応関係があるわけではない。

ところで、二枚貝の時化の際の挙動は、2 段階に分けて取り扱うべきものである。第 1 の段階は潜砂中の二枚貝の波による洗い出しのプロセスであり、第 2 の段階は水中に放出された二枚貝の波による移動のプロセスである。時化の際には過酷な波浪条件であることから、二枚貝、特に稚貝の水中での生存は静穏時と比較して格段に困難であるとの推測から、本研究では、砂層中からの洗い出しの非発生を生存条件として想定する PHABSIM を実施した。PHABSIM の結果は調査結果と比較的良好な対応を示したことから、この仮定の一定の妥当性は示されたと判断できるが、高生残率分布の詳細な特性を再現するには、水中に放出された後の移動プロセスの追跡も必要となるものと考えられる。なお、この点については掃流粒子の Lagrange の追跡法を適用した研究(例えば、桑原・日向野, 1993; 山下・和田ら, 1995)が行わ

れている。

5. 結 語

本研究では、河川環境の評価に適用される PHABSIM に着目し、PHABSIM を沿岸域の生態の生息環境評価に適用するための方法について考察した。特に漂砂系と関連の深い底生生物の生息環境評価を目的として、漂砂系の生息環境要素としての位置付けを行った。さらに、既存の PHABSIM 選好曲線(水理量と生息個体数の相関式)として経験的に処理される環境変化に対する生態の応答特性の評価にメカニズムを重視した数理モデルを導入するため、生態の挙動が物理的要因に強く規定される条件(具体的な適用例としては、時化の際の二枚貝の生存条件の推定)を選んで、PHABSIM を実施した。PHABSIM による生存可能領域の予測結果は、時化の前後に実施された現地調査の結果から算定した生残率の特性をほぼ良好に説明するものであり、PHABSIM の有効性が再確認された。

参 考 文 献

- 桑原久実・日向野純也 (1993): 波浪による二枚貝の岸沖移動に関する解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 311-315.
- 後藤仁志・酒井哲郎・豊田泰晴・酒井敦史 (1995): 暴浪時の二枚貝の洗い出し過程の漂砂力学的側面, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 501-505.
- 田中 仁・THU Aung (1993): 全ての flow regime に適用可能な波・流れ共存場抵抗則, 土木学会論文集, No. 467/II-23, pp. 93-102.
- 中村義治・三村信男・秋元義正 (1990): 波による二枚貝の輸送モデルと漁場の形成機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 819-822.
- 早瀬吉雄・宮本義憲 (1985): 海岸構造物によるホッキ貝漁場の形成機構に関する研究, 土木試験所月報, No. 386, pp. 1-11.
- 三村信男・鯉淵生・中村義治・喜田 潤・磯野良介 (1996): ホッキガイの生息分布と物理環境に関する総合的解析, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1051-1055.
- 山下俊彦・和田 彰・松岡 学・谷野賢二・明田定満 (1995): 振動流場での二枚貝の挙動に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 506-510.
- 山下俊彦・南村尚昭・伊藤慎一・谷野賢二・明田定満 (1996): 変動水圧下での潜砂性二枚貝の浮上機構, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 1076-1080.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 103-107.
- Bovee, K. D. (1982): A guide to stream habitat analysis using the Instream Flow Incremental Methodology, Instream Flow Information Paper 12, FWS/OBS-82/26, Cooperative Instream Flow Group, US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services.
- Boudreau, P., Bourgeois, G., Leclerc, M., Boudreault, A. and Belzile L. (1996): Two-dimensional habitat model validation based on spatial fish distribution, Ecohydraulics 2000, IAHR, pp. B 365-B 380, Quebec City, Canada.