

新保裕美*・田中昌宏**・池谷 毅***・越川義功****

・正会員	鹿島技術研究所	
・正会員 工博	鹿島技術研究所	主任研究員
・正会員 工博	鹿島技術研究所	水域環境グループ長
・正会員 水博	鹿島技術研究所	

図一1 観測海域と計測点

表-1 アサリの環境因子とその選択理由

環境因子	選択理由
底質	中央粒径 人工海浜の材料選定の目安となる
	泥分率
	強熱減量 アサリの餌となり、且つ海水の酸素消費に影響を及ぼす有機物の含有量の指標となる
水質	酸化還元電位 アサリに有害な硫化物の生成に影響
	水温 アサリの成長や生残に影響
	塩分 アサリの幼生変態や生残に影響
	干出時間 アサリへの餌供給や夏期の地温上昇に影響

1.0とし、アサリが生息していない粒径のSIを0.0とする。さらにこのSI曲線に一般性をもたせるため、既往の知見を(表-2参照)勘案して、最適な範囲や制限となる境界線を修正する。なおこの例では、最適な粒径0.25mmでもアサリが生息していない点もあるが、これらの点は、中央粒径以外の環境因子に制限されているものと考え、この点はHEPの重要な考え方の一つであり、各指標の満点はその海域での生息許容量と考える。

以下、図-3～8に示す他のSIモデルも同方法で作成した。図には最大個体数で基準化した個体数を併記した。

a) 底質のSIモデル

中央粒径のSIの決定方法を、さらに詳しく述べる。観測の結果、金沢八景海域では、個体数は、粒径0.25mmで極大であり、粒径が小さくなる程減少していた。飼育実験でも同じ傾向が指摘されている(高橋ら, 1986)ことから、粒径約0.2mm以下では、粒径が小さくなる程死亡率が高くなり、生息量が減少するものと判断される。生息の粒径下限は、金沢八景海域では粒径0.073mmであったが飼育実験により粒径0.062mmでも生残できることが判明しているため、粒径の下限値は、粘土となる0.05mmとし、SIを0.0とした。また、粒径0.2mmではSI=1.0、粒径0.2mm～1.0mmではSI=1.0、潜砂時間が長くなり、生息に障害が生じると考えられる粒径4.2mmではSI=0.0とし、SI曲線は、それらの間を線形に補間した。

図-3に、底質の泥分(粒径0.073mm以下)率のSIを示す。金沢八景海域では、個体数は泥分率約20%で極大であり、泥分率の増加に伴い減少していた。山口・大海湾(井上, 1980)及び朝鮮半島(倉茂, 1957)での泥分率と生息量との関係を検討すると、泥分率約30～50%間に生息限界があるようである。そこでSI曲線は、泥分率0～30%でSI=1.0、泥分率50%でSI=0.0とし、その間は線形に補間した。

図-4に、底質の強熱減量のSIを示す。金沢八景海域では、強熱減量約0.5～9%の範囲にアサリが生息し、個体数は3.5%で極大であった。これと三番瀬(千葉県, 1998)を比較すると、生息範囲と極大値は、厳密ではないが概ね一致していた。そこでSI曲線は、強熱減量2%

表-2 既往の知見の参考内容

環境因子	著者	参考内容
底質	中央粒径	高橋ら (1986) アサリの生存実験の結果、死亡率は、中央粒径0.25mmでは0%、0.070mmでは85%、0.062mmでは45%。 アサリの潜砂実験の結果、中央粒径4.2mmでは潜砂時間が長期化、これより小さい粒径の必要あり。
	泥分率	井上 (1980) 山口・大海湾において、泥分率が30%以上でアサリ定着性が激減。 倉茂 (1957) 全庁の主要なアサリ生息地約60箇所での調査結果、泥分率2～50%の範囲で生息。
	強熱減量	千葉県 (1998) 千葉県三番瀬において3年間の四季平均値でみると、強熱減量の1.5～8%の範囲でアサリが生息。アサリ個体数は約2%で極大。
	Eh	高橋ら (1986) H_2S 濃度とEh値を変えて餌の還元状態にした底土で飼育した結果、アサリの生息下限値はEh-130～-150mv。
水質	水温	倉茂 (1957) 高水温については、徐々に水温を昇昇した実験で、43℃では生息に阻害なく、45℃で100%死。低水温については、約-2℃でもほとんど死せず。 (社)全国沿岸漁業振興開発協会 (1997) ・岩底稚貝の時期は高水温への耐性が極めて弱く、水温35～36℃では5時間で死に始め、15時間で100%死。40℃では1時間で100%死(池松ら, 1956)。 ・幼生は12～30℃の範囲で正常に発生し、9～30℃の範囲では水温が高いほど成長速度が速い(島羽ら, 1992)。 ・海水量が最大になるのは28℃前後(秋山, 1985)。 ・酸素消費量は20～25℃が最大(海老原ら, 1967)。 ・隠微の隠微運動は23℃が最大(塚多村, 1937)。
	塩分	(社)全国沿岸漁業振興開発協会 (1997) ・通常の海水(塩分約35%)がアサリ生残を制限する要因にはならず、塩分約39%でも長時間の飼育でわずかに死する程度(倉茂, 1942)であるが、塩分濃度20%前後に境界があり、これよりも低塩分になるほど、また小型個体ほど、死亡が多く出現。 ・浮遊幼生は塩分15%以下では変態まで達する個体はなく、正常な発生のためには20%以上の塩分が必要である(Robinson and Breese, 1984)。しかし、20%であっても、水温によっては成長が悪化することがあり、安定した成長・生残を期待するには25%以上の塩分が望ましい。
	柿野ら (1995)	5月の実験では、成貝では塩分6.5%では生残率0%、13%で65%、16.5%で85%、19.5%で90%、32.5%で95%。実験に用いたアサリは若干肥満度が低く、活性が弱まっていたと思われるが、20%以下で生残率は減少傾向。
	干出時間	千葉県 (1998) 千葉県三番瀬において、3年間の四季平均値でみると、潮間帯と潮下帯では、潮下帯の方がアサリ個体数多数。 井上 (1980) 殻長2mmまでの沈着期のアサリの分布状況と地盤高からみて、大潮時平均干出時間5～5.5時間以上では沈着量は減少する傾向がみられたが、それ以下では明らかな傾向はみられなかった。殻長15mmまでの稚貝の分布状況と地盤高からみた定着条件としては4.5時間以下であり、成長度からみれば3.5時間以下が好適と考察。
底面摩擦速度(計算値)	千葉県 (1998)	全月で発生する程度の波高及びそれに対応する周期の入射波条件での波浪解析の結果と、千葉県三番瀬におけるアサリ生息量とを比較すると、波浪による底面摩擦速度が約1～6/sの範囲でアサリが生息。アサリ個体数は、約4cm/sで極大。
	柿野ら (1991)	荒天時の波浪条件での波浪解析の結果と盛岡干潟におけるアサリ生息量とを比較すると、殻長20cm未満のアサリ個体数は、波浪による底面摩擦速度約3～4cm/sで極大。

～5%でSI=1.0、0.5%でSI=0.0、9%でSI=0.0とし、これらの間は線形に補間した。

図-5に、底質の酸化還元電位(Eh)のSIを示す。金沢八景海域では、個体数はEh約-100mVで極大であり、-300mVの地点でも生存していた。飼育実験におけ

るアサリ生息の下限値は $-130 \sim -150$ mV と指摘されている(高橋ら, 1986)が, 金沢八景では -300 mV でも生息していたことから, -300 mV で $SI=0.0$ とした。最適な $Eh(SI=1.0)$ は, 金沢八景海域で個体数が極大であった -100 mV 以上とした。SI 曲線は, これらの間を線形に補間した。

b) 水質の SI

図-6 に水温の SI を示す。水温は, 秋の調査では $21 \sim 23^\circ\text{C}$, 冬は $10 \sim 14^\circ\text{C}$ の範囲にあった。秋には水温がアサリの生息環境の支配因子にはなっていないものの, 冬については, 概ね水温の上昇に伴い個体数にも増加傾向がみられた。飼育実験では, 水温上昇に伴いアサリの成長速度が速くなり, 20°C 台で最もアサリの活性が高くなる(社)全国沿岸漁業振興開発協会: 以下, 協会と記す, 1997)。倉茂(1957)の飼育実験において -2°C でもほとんど斃死しないことから, 海水が凍結する -3°C を低水温の生息限界($SI=0.0$)とした。高水温については, 着底稚貝が死に始めた 35°C (協会, 1997)を生息限界($SI=0.0$)とした。 $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ での SI を 1.0 とし, SI 曲線はそれらの間を線形に補間した。

図-7 に, 塩分の SI を示す。塩分も水温と同様, 秋と冬ではその範囲が異なっており, 秋は $14 \sim 32$, 冬は $26 \sim 34$ であった。アサリの生息環境としては塩分が低い方が問題である。そこで秋のデータをみると, 全体的に塩分の増加に伴いアサリ個体数も増加していた。他の因子が影響するので明確ではないが, 塩分が $10 \sim 20$ の間に生息限界があるようである。従って, 塩分の下限值($SI=0.0$)は, 浮遊幼生が変態可能となる, 15 (協会, 1997)とした。塩分の最適値($SI=1.0$)は浮遊幼生が正常に変態でき, 成体の生残にも影響しない $25 \sim 35\text{‰}$ とした(協会, 1997)。SI 曲線は, $15 \sim 25$ の間は $SI = ((\text{塩分} - 15) \times 0.1)^{0.5}$ の式で補間した。

ただし, 水質は, 時・日変動が大きく, また, 低塩分, 低・高水温の持続時間が短いとアサリに対する影響は小さい。従って, 評価に用いる値は, 連続的かつ長期データに基づき決定することが望ましいと考えられる。

c) 干出時間の SI

図-8 に, 干出時間の SI を示す。金沢八景海域では, 干出時間約 4.3 時間以下の地盤高で個体数が多かった。山口・大海湾では, 定着条件としては 4.5 時間以下, 成長度からみれば 3.5 時間以下が好適と考えられている(井上, 1980)。井上の知見を踏まえ, 金沢八景海域のデータを外挿するよう, 3.5 時間以下を最適($SI=1.0$)。 4.7 時間での $SI=0.0$ とした。SI 曲線はそれらの間を線形に補間した。

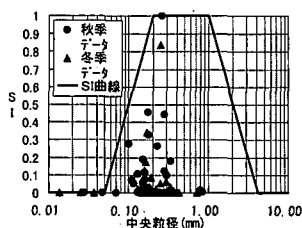


図-2 中央粒径の SI

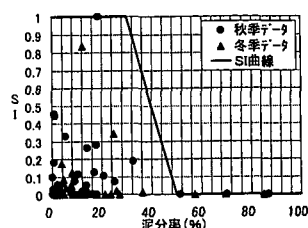


図-3 泥分率の SI

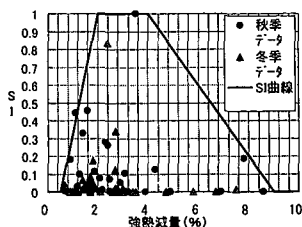


図-4 強熱減量の SI

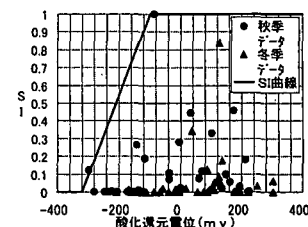


図-5 酸化還元電位の SI

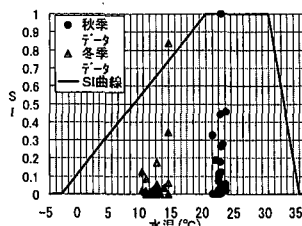


図-6 水温の SI

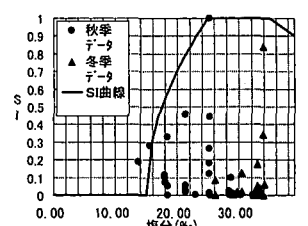


図-7 塩分の SI

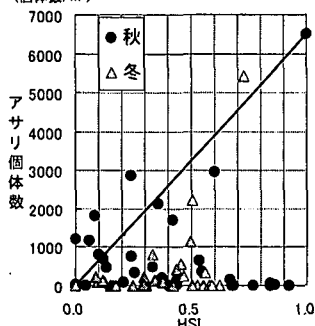
(3) HSI モデル

HSI は, 各 SI によって評価された環境因子を総合化し, 地域の生息地としての適性を数値化した指標であり, $0.0 \sim 1.0$ の数字で表す。

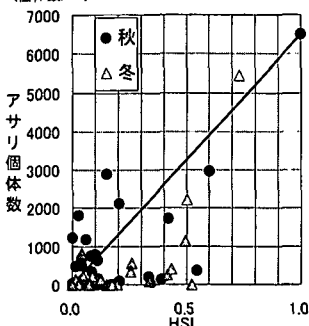
総合化の方法は, 各環境因子の相互の関係が, 制限因子であるか, 累積関係にあるか等を考慮して決定する。本モデルでは, 底質間には相関関係があるため, 底質 SI は, 底質項目の SI の最小値とした。水温と塩分はそれらの組合せによりアサリ生息への影響の度合いが異なるため, 水質 SI は, 水温と塩分の SI の積とした。最終的に HSI は, 底質, 水質, 干出時間の相乗効果があるものと考え, 次式の様これら SI の積とした。

$$\begin{aligned} \text{HSI} = & \text{底質 SI (中央粒径, 泥分率, 強熱減量, 酸化還元電位の SI の最小値)} \\ & \times \text{水質 SI (水温と塩分の SI の積)} \\ & \times \text{干出時間 SI} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

(4) HSI モデルの金沢八景海域への適用

(個体数/m²)

(a) オリジナルモデル

(個体数/m²)

(b) 摩擦速度を入れたモデル

図-9 HSIとアサリの個体数の関係

開発した HSI モデルを、金沢八景海域に適用した。図-9(a) に、HSI と実測個体数との関係を示す。これを見ると、秋冬ともに、HSI が高いが個体数が少ない点があり、HEP モデルとしては不十分である。

そこで、これらの点が海域のどのような点に位置するのかをみってみる

と、特に潮下帯に多く、平潟湾内や野島の南側水路内にもあることがわかった。潮下帯は潮間帯に比べて底質への波の作用が小さく、平潟湾内や野島南側水路は地形的な特性から波が弱い。そこで、HSI が高いが個体数が少ない点の原因が、波浪にあるのではないかと考えた。

4. モデルの改良

上記の結果から、波浪の影響を HEP に導入する事を試みた。アサリの生息環境に及ぼす波浪の影響は、底質粒径を決定するだけでなく、さらに定位、底質撹乱及び餌供給等、直接的な影響が多く考えられる。

そこで、金沢八景海域を対象に、波浪を数値解析し、その結果からアサリの波浪 SI モデルを作成した。

(1) 波浪解析

波浪解析には、オランダ・デルフト水理研究所の Delft 3 D-WAVE (1997) を使用した。計算条件は、現地観測時の波浪を再現することを目的に条件設定した。計算条件を表-3 に示す。

(2) 底面摩擦速度 SI モデルと HSI モデルの改良

図-10 に、波の底面摩擦速度 (以下 u_* と記す) の SI を示す。図には最大個体数で基準化した個体数も併記している。ここでの u_* は、各計測点における風向毎の u_* の内、最大値を用いた。なお、 u_* は、潮間帯については低潮位での汀線での値であり、潮下帯については吹送時の潮位 (南西風: 低潮位, 北・東風: 平均潮位) での値である。これより、 u_* が約 4 cm/s のとき個体数が極大

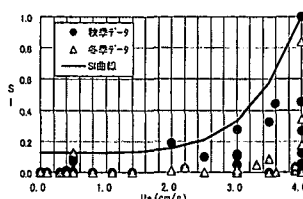


図-10 底面摩擦速度の SI

表-3 波浪の計算条件

風	南西 13.7 m/s, 北 13.1 m/s, 東 7.6 m/s (気象庁「SDP・横浜気象台の地上気象観測データ, 1994~1998」による)
潮位	平均潮位 0.0 m, 低潮位 -1.1 m
底面摩擦係数	0.01

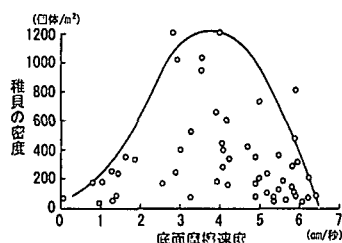


図-11 東京湾盤洲の底面摩擦速とアサリ稚貝密度の関係 (柿野ら, 1991)

である。これより、 u_* が約 4 cm/s のとき個体数が極大であることがわかる。図-11 に示すように、盤洲干潟においても u_* が約 4 cm/s のとき個体数が極大であり、それ以上大きくても小さくても個体数は減少していた (柿野ら, 1991)。また、この関係は三番瀬も同様であった (千葉県, 1998)。この $u_*=4$ cm/s は、柿野らが指摘するよう、アサリが定位できるかどうかの境界線であると考えられる。

SI 曲線は、 u_* と個体数の関係に基づき決定し、HSI は、次式のように波の u_*SI を加えて求めた。

$$HSI = \text{底質 SI} \times \text{水質 SI} \times \text{干出時間 SI} \times u_*SI \cdots (2)$$

(3) 金沢八景海域への適用

改良した HSI モデルを再度金沢八景海域に適用した。図-9(b) に HSI と個体数との関係を示す。波の u_* を考慮していない図-9(a) と比較すると、HSI と個体数との線形性が極めて高くなったことがわかる。これは、波の u_* をモデル変数に加えることで、潮下帯では水深の影響で波の u_* が小さくなり、平潟湾内や野島南側水路では波が進入しにくいことから波の u_* が小さくなり、HSI が小さくなったことによる。

モデル変数に波の作用を考慮する事は、評価地点の調査でわかる底質などの特性に加え、海域全体の中に占める評価地点の環境特性を評価に組み込む事を意味する。波浪の場合には、周辺の地形と防波堤などの構造物が重要となる。例えば、沖波条件と水深が同じであっても、周辺地形や構造物などの影響で波が変形を受け、対象地

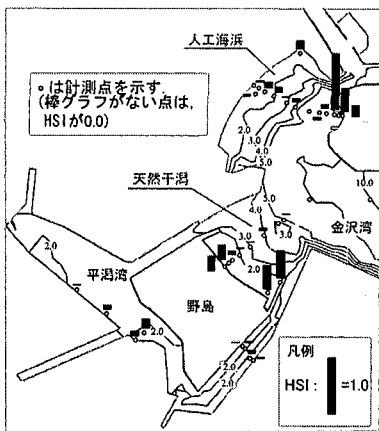


図-12 HSIの分布

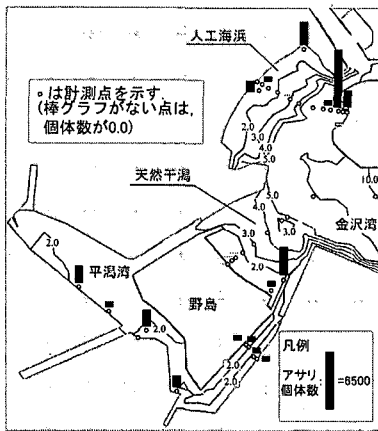


図-13 アサリ個体数の分布

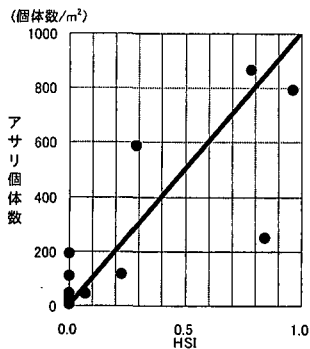


図-14 三番瀬の評価結果

点の波力は異なり、アサリの生息環境も異なる。さらに、アサリの生息環境への波浪の導入は、人工干潟の形状や配置を決定する上で極めて有効と考えられる。

図-12, 13に、金沢八景海域におけるHSIと、実測した個体数(秋)の分布を示す。これより、HSIと個体数が良好に対応している。また、HSIは、この狭い海域でもかなり変動していることがわかる。従って、アセスメントなどで海域の生物環境を評価する場合、本モデルのようなきめ細かな評価が必要であると考えられる。

5. モデルの千葉県三番瀬への適用

モデルの汎用性を確かめるため、千葉県三番瀬に改良モデルを適用した。三番瀬は、東京湾奥に位置する開放性の浅場であり、一部が人工干潟になっている。この海域は、多様な生物が生息する東京湾内で残り少ない貴重な浅場である。千葉県では、1994～1996年に底質や生物に関する詳細な現地観測を行い、そのデータ(千葉県, 1998)を公開しており、干潟研究を行う上で貴重なデータを提供している。しかし、公開されているデータは、1994～1996年度四季の平均値であるため、本モデルを適用するには問題があるが、本モデルの妥当性の判断資料にはなりうるものと考えられる。なお、水質及び干出時間については、アサリ個体数と関係づけたデータがなかったため、モデル変数は、底質及び波の u_* とした。

図-14に、三番瀬におけるHSIと個体数の関係を示す。HSIと個体数は概ね線形な傾向になっている。このように本モデルは、海域特性が異なる三番瀬でも良好な評価結果を示しており、アサリ生息環境を評価するモデルとして、かなり汎用性が高いものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、我国の干潟の代表生物であるアサリを対象に、HEPをベースにした生息地適性評価モデルを開発

し、その妥当性を確認した。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) アサリの生息地環境因子は、底質(中央粒径、泥分、強熱減量、酸化還元電位)、水質(水温、塩分)、干出時間に加え、波の底面摩擦速度が重要である。
- (2) 以上の環境因子のSIモデルを作成し、各SIの相互関係を考慮したHSIモデルを提案した。
- (3) 本モデルは金沢八景海域及び千葉県三番瀬においてアサリの生息量を評価できる事を確認した。

本研究から得られた知見は、単にアサリの生息環境の評価にとどまらず、今後の干潟の設計・施工技術に大いに役立つものと考えられる。

参考文献

- 井上 泰 (1980): 山口・大海湾におけるアサリの生態と環境について, 水産土木, Vol. 16, No. 2, pp. 29-34.
- 柿野 純・中田喜三郎・西沢 正・田口浩一 (1991): 東京湾盤洲干潟におけるアサリの生息と波浪との関係, 水産工学, Vol. 28, No. 1, pp. 51-55.
- 柿野 純・古畑和哉・長谷川健一 (1995): 東京湾盤洲干潟における冬季のアサリのへい死要因について, 水産工学, Vol. 32, No. 1, pp. 2-32.
- 倉茂英次郎(1957): アサリの生態研究, 特に環境要素について, 水産学集成, pp. 611-655.
- (社) 全国沿岸漁業振興開発協会 (1997): 増殖場造成計画指針—ヒラメ・アサリ編—(平成8年度版), p. 304.
- 新保裕美・田中昌宏・越川義功・棚瀬信夫・池谷 毅 (1999): 現地調査によるアサリ生息量と環境要因との関係の検討—神奈川県金沢湾・平潟湾を対象として—, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1216-1220.
- 高橋清孝・佐藤陽一・渡辺 競 (1986): アサリの生存限界に関する実験的検討, 宮城県水産試験場研究報告, 11, pp. 44-58.
- 千葉県土木部企業庁 (1998): 「市川二期地区・京葉港二期地区計画に係る環境の現況について」(要約版), p. 336.
- Delft Hydraulics (1997): DELFT 3D-WAVE, Delft wave calculation model based on HSIWA, User Manual, Ver. 1.02.
- Division of Ecological Services, U. S. Fish and Wildlife Service (1980): Habitat Evaluation Procedures.