

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	大平 和弘
学位授与の日付	平成25年3月31日	
論文名	ウミホタルを指標とした内湾における砂浜環境の評価モデルに関する研究	
論文審査委員	主査	上甫木昭春
	副査	増田 昇
	副査	石井 実

## 論文要旨

### 第1章 研究の背景および目的

大阪湾のように外海と隔てられて奥行きが深い「内湾」では、都市化に伴い砂浜や干潟の消失に加え、水質や底質の悪化が深刻化し、浅海域の生物相に大きな被害をもたらしてきた。このような状況に対し、大阪湾を例にみると、生物生息空間の再生を目的とした砂浜の整備事業などの場の整備と、人為的な影響を受けやすい底生生物の生息環境の確保といった質の改善が取り組まれている。しかし、多様な生物にとって健全な砂浜環境（水質や底質が良好に維持され、多様な生物の生息空間として機能する砂浜の環境）を、どの程度再生・保全できているのかについて、定量的に評価することは難しく、その評価手法も確立されていない。これに関し、近年沿岸域の環境を、ある特定の生物の生息地としての適性から定量的に評価する手法として、**HSI (Habitat Suitability Index; 生息地適性指数)**モデルが注目されている。しかしながら、砂浜に棲む生物を対象にした **HSI** モデルについても、ごく僅かの研究報告に留まっている。

一方、大阪湾の人工造成された砂浜において、一般にきれいな砂浜のシンボルといわれるウミホタル (*Vargula hilgendorffii*) の生息が確認され、大きな盛り上がりを見せている。ウミホタルは体長 **3mm** 程の甲殻類で、青白い発光液を放出して人々の関心を惹くことから、近年環境啓発活動や観光資源として全国各地で取り上げられる機会が急速に増えている。

また、ウミホタルは移動・拡散しにくい底生生物であること、採集・同定が容易なことから、砂浜環境を評価する生物としてのポテンシャルが高いと考えられる。しかし、ウミホタルの生息場所がどのような環境であるのかについては、これまでほとんど解明されていない。

そこで本研究では、ウミホタルが健全な砂浜環境を示す可能性に着目し、ウミホタルを指標に内湾における砂浜環境の健全性を評価するモデルを構築することを研究目的とした。まず、ウミホタルの分布状況に影響する砂浜環境について明らかとし（第2章）、底生生物の群集構造から、ウミホタルの健全な砂浜環境の指標種としての有用性を検討した（第3章）。次に、生息条件の項目ごとに、ウミホタルの生存に対するより詳細な影響について、飼育試験および個別の調査から定量的に明らかにした（第4章）。そして、これらの結果を踏まえ、ウミホタルの HSI モデルを作成し、砂浜環境の健全性の評価に本モデルが有用であるかどうかを検証した（第5章）。

## 第2章 ウミホタルの分布状況に影響する砂浜環境

本章では、大阪湾東岸域に位置する 17 箇所の砂浜を対象に、70 の調査地点を設定した。調査地点の砂浜環境は、水質や底質などウミホタルに直接影響する「地点環境」と、地点環境に影響する人工構造物の存在状況などの「周辺環境」から把握した。一方、ウミホタルの分布状況は、ベイトトラップによる捕獲調査を計 5 回実施し、捕獲個体数を計数してその平均値から把握した。

捕獲調査より、ウミホタルは湾央の関西国際空港島以南に分布し、湾央南部において多数生息することが明らかとなった。このようなウミホタルの分布状況を規定する生息条件を抽出するため、個体数と地点環境との関係について、一般化線形モデルによる解析を行った。その結果、説明率が 74.6%となるモデルが作成され、溶存酸素量（説明率：30.3%）・含泥率（15.1%）・塩分濃度（14.9%）・酸化還元電位（12.4%）が主要な生息条件となっていることが示された。

また、地域ごとの状況に着目すると、生息のみられなかった湾奥の地点では、周辺河川等により、水質の塩分濃度が 2.0%以下、溶存酸素量が 5.0mg 以下と低い傾向にあった。また、前面が人工島により遮蔽されているため、底質の酸化還元電位が -200mV 以下の著しい還元状態を示した。対して、500 個体以上の多数の生息がみられた湾央南部の地点では、概ね溶存酸素量が 5.0mg/L 以上、塩分濃度が 2.7%以上となり、人工構造物からの影響を受けにくい地点では、酸化還元電位が 200mV 前後の酸化的な底質となっていた。このことから、周辺環境の違いにより地点環境が変化し、ウミホタルの分布状況に差が生じていたことが示唆された。

## 第3章 砂浜の底生生物の群集構造から捉えたウミホタルの指標種としての有用性

本章では、底生生物が豊富に生息する大阪府南部の 5 箇所の砂浜を対象とし、岸沖方向に調査測線を 7 本設け、36 の調査地点を設定した。そして、小型船舶から採泥器や採水器を投入して水質・底質などの環境条件を測定する採泥調査を実施した。底生生物は、採取した底泥から全生物を選別し、顕微鏡により調査地点ごとに同定・計数した。

本調査により、3,350 個体が確認され、12 動物門 16 綱 38 目 89 科 142 種が同定された。これら出現種の調査地点ごとの個体数を用い、群集構造を把握するため、TWINSPAN（二次元指標種分析）による序列化を行い、出現種と調査地点を分類した。その結果、7 つの種群（a～g 種群）と 6 つの地点グループ（I～VI グループ）に分類された。分類の結果より、ウミホタルの属する[種群 a]は、多様な動物門の種で構成され、汚濁の少ない場所を好む、ヒガシナメクジウオなどの希少種やアサリやマテガイなどの水産有用種を多く含んでいた。対して、[種群 b,c,d]は普通種中心の種群、[種群 e,f,g]は汚濁指標種を含む種群であることが示された。

また、INSPAN（指標種分析）により、地点グループごとの指標種を抽出した結果、ウミホタルは、グループ I の指標種と判定され、出現率は 89.7%となった。この値は指標種の中で最も高く、ウミホタルが指標種としての適性に優れていることが統計的に示された。

さらに、DCA（除歪対応分析）による序列化を行い、軸スコアと環境条件との相関関係から、各地点グループの属性を明らかにした。これより、グループ I は他グループに比べ、溶存酸素量や酸化還元電位が最も良好に維持された、狭い条件を有することが示された。

これらの結果より、ウミホタルは内湾の砂浜において保全の優先されるべき、健全な砂浜環境を示す指標種として有用であると示唆された。

#### 第 4 章 ウミホタルに適した水質・底質条件の解明

本章では、室内における飼育試験により、第 2 章で主要な生息条件として抽出された水質項目（溶存酸素量・塩分濃度）とウミホタルの生存状況との関係を検証し、生息に適した値を解明した。また、水質が概ね良好に維持された大阪府南部における採泥調査（第 3 章の調査）より、底質項目とウミホタルの分布状況との関係を検証し、生息に適した値を統計的に明らかにした。

まず、塩分濃度とウミホタルの生存状況との関係を把握するため、塩分濃度が 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5（%）と無調整（3.0%）の 6 段階の試験区を設定し、ウミホタルを 20 個体ずつ投入した。そして、生存状況を「遊泳」「衰弱または斃死」に評価する試験を 5 回反復した。その結果、遊泳個体に着目すると、2.0%以上では、試験終了まで多くの個体が遊泳したが、1.0%以下では、30 分以内にほとんど遊泳がみられなかった。続いて、プロビット法を用いて試験 24 時間後の衰弱・斃死個体の割合から、半数影響濃度（EC50）の平均値を求めた。これより、生息に必要な塩分濃度は、1.57%以上と判断された。

次に、溶存酸素量とウミホタルの生存状況との関係を把握するため、溶存酸素量が 1.0、

2.0、3.0、4.0、5.0 (mg/L)、飽和海水 (6.0mg/L 以上) の 6 段階の試験区を設定し、塩分濃度の試験同様に生存状況の評価した。遊泳個体に着目すると、溶存酸素量の減少と経過時間に応じて、遊泳率が低下した。また、プロビット法を用いて半数影響量 (ED50) の平均値を求めた結果より、生息に必要な溶存酸素量は、**3.7mg** 以上と判断された。

一方、生息に必要な底質条件を定量的に明らかとするため、第 2 章の一般化線形モデルにおいて説明率の高かった含泥率・酸化還元電位の 2 項目について、採泥調査の 36 地点をケースとした単回帰樹木による解析を行った。その結果、含泥率が **1.280%** 以上となるとほとんど生息しないことが統計的に示されたことから、生息に必要な含泥率は、**1.280%** 未満と判断された。同様に酸化還元電位については、生息に必要な値が **-5.5mV** 以上と判断された。

これらの結果より、ウミホタルの生息に適した水質・底質条件が定量的に明らかとされた。

## 第 5 章 ウミホタルを指標とした砂浜環境の評価モデルの構築とその評価

本章では、砂浜環境の評価モデルとして、ウミホタルの **HSI** モデルを構築した。

**HSI** モデルは、対象種の生息条件の各変数について、不適値 (**0**) から最適値 (**1.0**) の範囲に指数化させ、それらの変数を組み合わせた数式から成る。本研究では、モデルの変数として、第 2 章および第 4 章より説明力の高かった溶存酸素量、塩分濃度、酸化還元電位、含泥率の 4 項目を用いた。また、各変数を指数化する際の最適値は、第 2 章の捕獲調査において捕獲個体数が最大であった地点の値から設定した。さらに、不適値の設定に際し、溶存酸素量と塩分濃度については、第 4 章の飼育試験から得られた半数影響量 (濃度) の値を用い、酸化還元電位と含泥率は、第 4 章の採泥調査の解析から得られた値を用いた。

具体的には、溶存酸素量の不適値は **3.7mg/L** 未満、最適値は **6.12mg** 以上となり、塩分濃度の不適値は **1.57%** 未満、最適値は **2.6%** 以上、酸化還元電位の不適値は **-5.5mV** 未満、最適値は **219mV** 以上、含泥率の不適値は **1.28%** 以上、最適値は **0.077%** 未満と設定され、各変数が指数化された。

そして、4 変数のうち 1 変数でも不適値となると生息できないとし、次式を作成した。

$$HSI = \text{塩分濃度指数} \times \text{溶存酸素量指数} \times \text{酸化還元電位指数} \times \text{含泥率指数}$$

上記のモデルによる評価値と実際の捕獲個体数との関係性を把握したところ、決定係数が **0.732** となり、実際の個体数を 7 割以上説明する適応性の高いモデルであることが示された。

また、大阪湾東岸域の実態に基づき、周辺環境、地点環境、底生生物の生息状況などの砂浜環境と、モデルの評価値との関係を整理した。これにより、砂浜環境の相対的な健全度とモデルの評価値との間に一致がみられ、本モデルが砂浜環境の健全性を評価するモデ

ルとして有用であることが確認された。

本研究成果により、砂浜環境の健全性を、ウミホタルの個体数から可視化することが可能となった。これにより、市民参加型のモニタリング調査においてウミホタルを活用するなど、既存の環境啓発活動の質を高めることに寄与すると考えられる。また、砂浜の新規造成や維持管理において本モデルを適用することで、砂浜環境の定量的な予測・評価が可能となり、内湾の砂浜における生物相に配慮した空間整備に貢献できることが期待される。

## 審査結果の要旨

大阪湾のように外海と隔てられて奥行きが深い「内湾」では、都市化に伴い砂浜や干潟の消失に加え、水質や底質の悪化が深刻化し、そこに棲む生物への影響が懸念されている。これに対し近年、大阪湾再生行動計画に見られるように、多様な生物の生息空間の再生を目的とした砂浜の造成や人為的な影響を受けやすい底生生物の生息環境の確保が課題となっている。このような状況の中、一般にきれいな砂浜のシンボルといわれる底生生物のウミホタル (*Vargula hilgendorfii*) は体長 3mm 程の甲殻類で、青白い発光液を放出することから、環境啓発のツールや観光資源として社会的関心が高まっている。しかし、ウミホタルの生息場所がどのような環境であるのかについては、これまでほとんど解明されていない。本研究では、ウミホタルの健全な砂浜環境を示す指標種としての有用性に着目し、ウミホタルの分布状況に影響する砂浜環境の水質条件や底質条件などを探り、ウミホタルを指標とした内湾における砂浜環境の健全性を評価する HSI (Habitat Suitability Index ; 生息地適性指数) モデルの構築を行っている。ここで得られた成果は以下の通りである。

1. ウミホタルの分布状況に影響する砂浜環境を探るために、大阪湾東岸域に位置する 17 箇所の砂浜を対象に、70 の調査地点を設定し、ウミホタルの生息密度と地点環境との関係を一般化線形モデルにより解析した。その結果、溶存酸素量 (説明率 : 30.3%) ・含泥率 (15.1%) ・塩分濃度 (14.9%) ・酸化還元電位 (12.4%) が主要な生息条件となっていることを明らかにした。
2. 健全な砂浜環境の指標種としてのウミホタルの有用性を探るために、底生生物が豊富に生息する大阪府南部の砂浜を対象とし、砂浜の成り立ちや人工構造物の存在状況などを考慮して設定した 36 の調査地点で採泥調査を実施し、底生生物の群集構造を検討した。その結果、底生生物は、3,350 個体が確認され、12 動物門 16 綱 38 目 89 科 142 種が同定された。次いで、それらの出現種の調査地点ごとの個体数を用いて TWINSPAN (二次元指標種分析) による序列化を行い、7つの種群 (a~g 種群) と 6つの地点グループ (I ~VIグループ)

ブ)に分類した。その結果、ウミホタルの属する[種群 a]は、多様な動物門の種で構成され、汚濁の少ない場所を好む希少種や水産有用種を多く含んでいること、さらに [種群 a]との関係が強い地点グループ I は、DCA (除歪対応分析)により溶存酸素量や酸化還元電位が狭い領域であることが示された。また、INSPAN (指標種分析)により地点グループ I の指標種としてウミホタルが抽出され、その出現率は 89.7%と最も高いことより指標種としての適性に優れていることが示された。以上のことより、ウミホタルが内湾における健全な砂浜環境を示す指標種として有用であることを明らかにした。

3. ウミホタルに適した水質条件を探るために、室内で塩分濃度および溶存酸素量について 6 段階の試験区を設定した飼育実験より、24 時間試験後の衰弱・斃死個体の半数影響濃度 (EC50) および半数影響量 (EC50) をプロビット法より算出した結果、生息に必要な塩分濃度は 1.57%以上、溶存酸素量は 3.7mg 以上であることを明らかにした。さらに、底質条件を探るために、採泥調査の 36 地点をケースとした単回帰樹木による解析結果より、生息に必要な含泥率は 1.28%未満、酸化還元電位は-5.5mV 以上であることを明らかにした。

4. 以上の結果をもとに、ウミホタルの HSI モデルの変数として、溶存酸素量、塩分濃度、酸化還元電位、含泥率の 4 項目を選定し、溶存酸素量の不適値は 3.7mg/L 未満、最適値は 6.12mg 以上、塩分濃度の不適値は 1.57%未満、最適値は 2.6%以上、酸化還元電位の不適値は-5.5mV 未満、最適値は 219mV 以上、含泥率の不適値は 1.28%以上、最適値は 0.077%未満と設定し、下記に示す HIS モデルを構築し、ウミホタルの実際の生息密度を 7 割以上説明する適応性の高いモデルであることを確認した。

$HSI = \text{溶存酸素量指数} \times \text{塩分濃度指数} \times \text{酸化還元電位指数} \times \text{含泥率指数}$

また、周辺環境、水質・底質、底生物の生息状況などの砂浜環境と、本モデルの評価値との関係を検証することで、本モデルが砂浜環境の健全性を評価するモデルとして有効であることを確認した。

本研究成果により、ウミホタルの生息密度から砂浜環境の健全性を評価できることが示された。このことから、砂浜の新規造成や維持管理などの計画・設計段階において、本モデルを適用することで砂浜環境の健全性の定量的な予測・評価が可能となり、内湾の砂浜における多様な生物に配慮した空間整備に貢献できることが期待できる。さらに、市民参加型の砂浜環境のモニタリング調査や環境啓発活動などにウミホタルを活用できることが期待される。これらの成果は、地域生態学ならびに緑地環境科学領域の発展に大きく寄与するものと考えられ、最終試験の結果と併せて、博士 (緑地環境科学) の学位を授与することを適当と認める。