

沿岸自然再生の計画・設計を支援する環境評価 手法に関する一考察

田中昌宏¹・上野成三²・林 文慶³・新保裕美⁴・高山百合子⁵

¹正会員 工博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

E-mail:masahiro-tanaka@kajima.com

²正会員 工修 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 学博 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁵正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

沿岸自然再生の具体的な計画・設計で必要となる環境評価手法について考察した。自然再生の目標として“自立した生態系”を挙げ、それを達成するための視点として二つの生態系の連続性に着目した。一つは局所的な岸沖方向の連続性であり、ヨシ原、干潟、藻場の生態学的な連続性である。もう一つは浮遊幼生期を有するベントスの再生産過程で重要な空間的に離れた干潟間の連続性、すなわち“干潟ネットワーク”である。ヨシ原、干潟、藻場の個々の場については、代表生物に対する生息環境評価モデルとしてHSIモデルを提示した。さらに連続性を評価する総合評価手法については、基本コンセプトを提示した。

Key Words : *nature restoration, coastal wetland, habitat evaluation procedure, reed filed, tidal flat, seagrass bed, design, planning*

1. はじめに

我が国の社会は、20世紀型の経済優先・自然破壊の時代から、21世紀の大きなテーマである「自然との共生」の時代へと大きく変化している。例えば2003年1月1日に自然再生推進法が施行され、自然再生が国家事業の一つに位置付けられた。こうした中、市民主体の環境保全や自然再生事業を円滑に進める上で、あるいは様々なステークホルダーが対立する環境問題を解決する上でも、今最も必要とされている技術は、まず自然環境を科学的に定量評価し、さらに劣化した自然環境の再生・修復を実現する具体的な技術である。

こうした社会ニーズに応えるため、著者ら^{1), 2), 3)}は沿岸域のヨシ原、干潟、藻場から成る湿地帯の再生技術の開発研究を進めている。本稿では、沿岸の自然再生を具体化するために、計画・設計の視点から必要となる評価手法について検討した。

2. 沿岸自然再生の目標と生態系の連続性

沿岸の自然再生を本格的に進めていくためには、まず現状の問題を分析した上で、自然再生の目標を明確に設定することが重要と考えられる。東京湾を例に取れば、現状は富栄養化が基本的な問題であり、

夏季の底層の貧酸素化、赤潮や青潮の発生によって、生物の生息環境が著しく阻害され、全体のバイオマスは大きいものの、多様性の低い貧弱な生態系となっている。特にハマグリ、アサリに代表される干潟生物の減少は著しい。このため、アサリ等の重要な水産生物は稚貝を撒く等の方策が取られているが、人間の補助なしにはもはや生存が危うくなっている。

したがって、自然再生においては、個々の生物が自然に再生産を行い、種の競合や食物連鎖の枠組みの中で、種を維持できる環境を創り上げる必要がある。このような環境を創り上げることが自然再生の目標であり、これを本研究では“自立した生態系”と呼ぶ。この健全な自立した生態系を再生することが、どの海域にも共通した自然再生の目標になるものと考えられる。

それでは、自立した生態系を再生する上で重要な要素はなんなのであろうか？本研究では、ふたつの生態系の連続性に着目した。一つは、かつての内湾の沿岸の姿であるヨシ原—干潟—藻場が連続して存在する沿岸であり、もう一つは、干潟ベントスの再生産において重要な空間的に離れた干潟相互の関係“干潟ネットワーク”（風呂田⁴⁾）である。

これまでも干潟や藻場などはいくつかの造成例がある。しかし、自然再生という観点からすると十分とは言い難い。この理由は、これらを創る技術が未熟というだけでなく、干潟、藻場といった自然

の中での個々の構成要素を単独で創っていることに、根本的な問題があると考えられる。本来自然は干潟や藻場などの重要な構成要素の存在とそれら相互の空間的な連続性によって、生物が多様に生息する豊かな自然が形成されている。自立した生態系には、まず、ヨシ原、干潟、藻場の連続性が重要と考えられる。筆者らがイメージしている沿岸湿地帯の修復・再生のイメージは図-1に示すように、内湾の直立護岸によって直線化された水際線を、勾配を持った海岸線に再生することである。この勾配の意味は、海岸地形が物理的に勾配を持つことと、図のように陸からヨシ原→干潟→藻場と、生物の生息域に勾配、すなわち連続性を持たせる意味が重要である。ただし、この三つの場がすべてそろっていない自然環境として不十分かという点、そうではない。その海域の特性によって、背後地にヨシ原のない干潟もあれば、沖に藻場のない干潟も自然の姿の一つである。本研究では、これまでの干潟や藻場造成に欠けていたそれらの相互の生態学的関係を明らかにするために、三つの場の連続性に着目した。

さらに後述するように沿岸域の生物の多くは浮遊幼生期を有しており、産卵場所と着底場所が必ずしも一致していない。これは生物の再生産という、生態系維持において欠くことのできない過程を考える上で、その場の環境だけではなく、遠く離れた干潟間の関係、“干潟ネットワーク”が重要であることを意味している(図-2参照)。

したがって、自立した生態系を再生するためには、沿岸生態系の構成要素であるヨシ原—干潟—藻場の岸沖方向の連続性と、干潟ネットワークを基本とした湾スケールの連続性の二つの連続性の概念が重要と考えられる。

3. 生物環境評価の全体構成

(1) 環境評価の基本コンセプト

自然再生を具体化していくためには、自然再生の計画・設計を技術として体系化する必要がある。そのためには自然を定量的に評価する技術が必須である。当然、これまでも生物・生態学などの分野で環境評価の研究はなされてきている。しかし、目的が生物あるいは生態系の中身の探求にあるために、分析には優れている評価方法であっても、自然再生の計画や設計という工学的な要求を満たす内容としては不十分である。例えば、生物の生息環境因子として何が重要かを明らかにするために、生物量と環境因子間の重回帰分析などの統計解析が行われている。こうしたアプローチは生物が生息する上での重要な因子を抽出するための重要なステップであるが、個々の環境因子の定量的な評価にまで至っていない。したがって、何をどの程度、どのように用意すれば生物が棲めるかという具体的な情報が不足している。

本研究では、沿岸の自然再生を具体的に進めていく上で必要となる計画・設計を支援する生物環境を

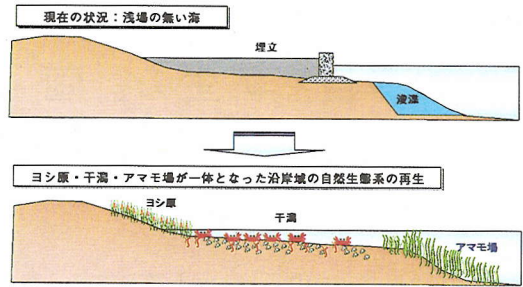


図-1 沿岸の自然再生のイメージ

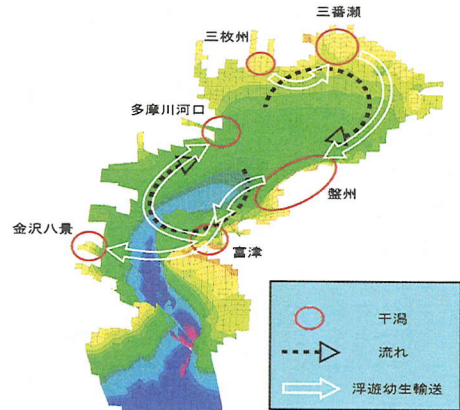


図-2 干潟ネットワークの概念図(東京湾)

定量評価する手法の開発を目的とした。

(2) 計画と設計に必要な評価

具体的な自然再生事業においては、上記したように目標を明確に設定した上で、対象海域のマスタープランを作成し、個々の場の自然再生を進めることになる。マスタープランを作成する際には、対象海域の目標を最も効率的に達成するために、海域のどの場所を優先的に、あるいはどのような順番で再生すればよいかを検討する必要がある。このためには、先に述べたような“干潟ネットワーク”を評価すること、魚類や鳥類の中には生活史や生活行動が海域を広く利用するものもあるため、それらの特性を定量評価する必要がある。さらに沿岸湿地帯個々の構成要素について、生物が必要とする広さや構成要素間の空間距離なども計画において必要となる。

全体計画が決まれば、個々の場の再生事業へと移り、ヨシ原、干潟、藻場の各構成要素を造成していくことになる。この段階では、底質材料の特性(粒径、泥分率、強熱減量等)、地盤高、勾配などの設計条件を決める必要がある。従来こうした設計条件は、地盤の安定などの力学的な条件や専門家の経験から決められてきた。自然再生を目的とした造成においては、生物の生息環境の観点から客観的に設計条件を決める必要がある。こうした設計条件を決める環境評価技術が必要である。

以上から、環境評価手法には2つの段階が必要と

考えられる。一つは、ヨシ原、干潟、藻場の各構成要素に対する対象生物の生息環境評価であり、もう一つは、それらを総合した評価手法である。

4. 代表生物の生活史及び生活行動

具体的な環境評価手法開発の基礎データとして、ヨシ原、干潟、藻場を利用する代表的な生物について、生活史及び生活行動を整理した^{5), 6), 7), 8), 9), 10)}。

a) 魚食性鳥類（セグロカモメ、サギ類）

河口の鳥類、特にセグロカモメが干潟に多く出現する。干潟に休憩し、内湾の浅瀬に魚類を採集している行動を取る。コサギは、全国に一年中生息し、満潮時の干潟にも魚類を採集している行動を取る。

b) ベントス食性鳥類（シギ、チドリ等）

（図-3(a)参照）

渡り鳥であるシギ、チドリは、春と秋の年2回、繁殖地と越冬地への渡りの途上に干潟に飛来する。干潟はこの鳥類の採食場所である。干出時に干潟に生息する甲殻類、貝類、多毛類を捕食する。休憩場また、敵から一時の避難場としてヨシ原を利用する。

c) 海藻食性鳥類（ハクチョウ、カモ類）

オオハクチョウは、欧亜の北地で繁殖し、冬には日本等の湖沼、遠浅の海岸に渡来する。主に海藻を食する。カモ類は、冬季、東京湾の浅瀬に多く飛来する。湿地状になった干潟ではカルガモ、マガモやオカヨシガモが越冬する。これらのカモは浅瀬に生息するアナアオサ等の海藻を採食する。

d) プランクトン食性魚類（アイナメ、鯛稚魚等）

アイナメは、藻場や岩礁域に生息する。産卵期は秋から初冬、水深5~30mの潮通しの良い岩礁帯、転石帯で産卵する。卵は岩や海藻等に産み付けられる。稚魚はアマモの生えた砂地周辺に多く出現し、カイアシ類等の動物プランクトンを捕食する。

e) ベントス食性魚類（トビハゼ、ムツゴロウ等）

（図-3(b)参照）

トビハゼは泥干潟に巣穴を掘り、干潟に生息するスナガニ類（チゴガニ、コメツキガニ）、多毛類を捕食する。ムツゴロは干潟表面の付着珪藻類を食する。両者とも孵化した稚魚が浅瀬（藻場を含め）、内湾で過ごす。

f) プランクトン・雑食性干潟カニ類（チゴガニ、アシハラガニ等）（図-3(c)参照）

チゴガニの成体は干潟上部中部とヨシ原下部に巣穴を掘り、干潟底質有機物を摂取する活動をしている。ヨシ原は干潮時に水鳥の捕食から逃れるための避難場でもある。そして、毎年6~8月に抱卵個体は干潮時の干潟に放卵する。孵化した幼生は沿岸域（藻場を含め）に浮遊生活し、干潟の底質に定着する。また、ヨシ原に巣穴を掘り生活するアシハラガニは、ヨシ原及び干潟の底質有機物を摂取する。産卵は、毎年6~8月に抱卵個体を干潮時に干潟に放卵する。孵化した幼生は沿岸域（藻場を含む）を遊泳生活し、干潟に定着する。

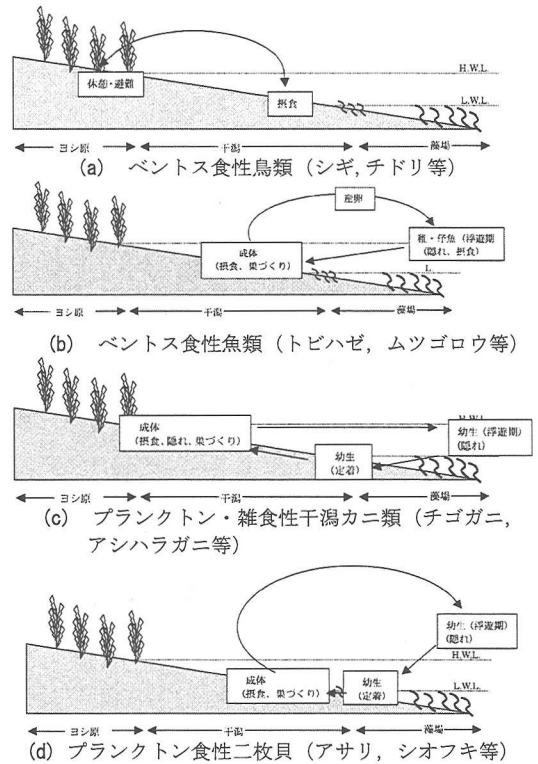


図-3 代表生物の生活史・生活行動の例

g) プランクトン・雑食性多毛類（イトゴカイ等）

イトゴカイの成体は干潟でも表面が小石で覆われた砂泥質の潮間帯中部から下部にかけて分布する。抱卵個体は春から夏の日没に放卵する。孵化した幼生は約6日間の浮遊生活後、干潟底質に定着する。

h) プランクトン食性二枚貝類（アサリ、シオフキ、バカガイ等）（図-3(d)参照）

アサリの成体は干潟下部に生息する。春先と秋に産卵し、幼生は沿岸域（藻場を含め）に2週間ほど浮遊生活し、干潟の底質に定着する。他の貝類、シオフキガイ、バカガイ等も同様な生活史を示す。

i) 肉食・雑食性貝類（ツメタガイ、ホソウミニナ等）

ツメタガイは卵を干潟に生み、孵化した幼生は内湾（藻場を含め）で過ごし、浮遊期の後期に干潟に着底する。成体は肉食で、アサリの天敵である。ホソウミニナは、幼生の浮遊期を持たず、卵から稚貝が直接孵化する。成体も幼生も干潟で生活し、底生生物死骸等を捕食する。

その他の代表生物を含め、生物の活動範囲と捕食・被食の関係をまとめたものが図-4である。

5. 個別構成要素における生物生息地環境評価モデル

上記のように生物毎に生活史・生活行動は異なり、すべての生物について、完璧な生息環境を用意する

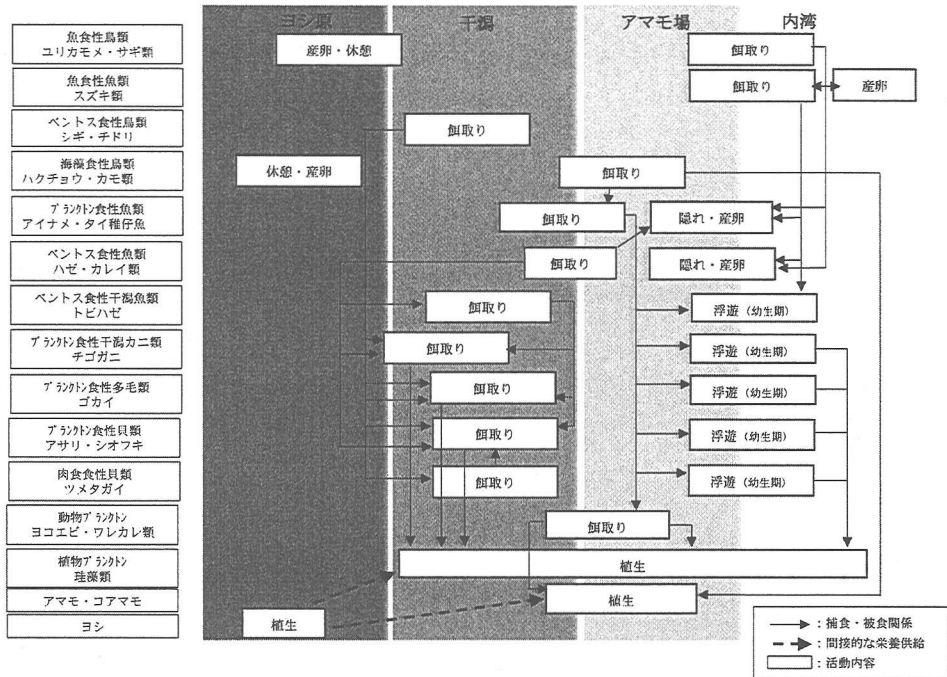


図-4 沿岸の代表生物の活動範囲及び捕食・被食の関係

ことは不可能である。また当然すべての生息環境を人為的にコントロールすることも不可能である。

そこで、ヨシ原、干潟、藻場の個別構成要素の環境評価においては、生物そのものではなく生物の生息の場を主体に評価する事とした。“場”を重視する理由は、最終的に自然を再生する具体的な人為的の行為は、生息基盤の再生であるからである。また“場”を評価する際の対象生物には、個々の個別構成要素に広く分布する代表生物を選択することにより、周辺の他の生物の生息地としての代表性もあるものと考えた。

具体的な生物の生息地の環境評価手法は、米国のミチゲーション手法として最も代表的な HEP (Habitat Evaluation Procedure)¹¹⁾ における HSI モデルをベースにした。

以上の考え方にに基づき、筆者らは、ヨシ原の代表生物としてヨシ、干潟についてはアサリ、ゴカイ、カニ、藻場についてアマモを対象として生息環境評価モデルを作成した^{1), 2), 3)} (アマモは作成中)。

HSI は、まず対象生物毎に生息に影響をおよぼす環境因子を洗い出し、次に各因子について生息環境の点数化 (SI モデルの作成) し、それらを総合化して一つの数値 (1 点満点) として求める。

著者らの一部¹⁾が開発したアサリのモデルを例に SI (Suitability Index) モデルについて説明する。アサリの生息環境因子として重要な項目は図-5 のようになる。各因子の SI モデルは、底質の中央粒径を例に取れば、図-6 のようになる。SI は生息不可能な条件では 0 を取り、最適な生息条件では 1 を取る。この SI 曲線は既往の研究や現地観測データを基に作

成する。各環境因子について同様に SI モデルを作成し、環境因子相互の関係を勘案して、SI 値の掛算などの簡単な演算によって HSI を求める。

アサリの HSI は次式から算出した。

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

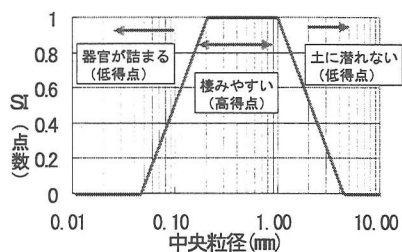


図-5 アサリの HSI モデルの構成

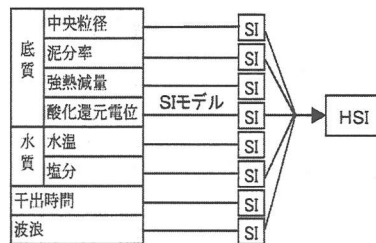


図-6 アサリの SI モデルの例 (底質の中央粒径)

図-7はアサリのHSIの評価結果と実測の個体数をその地点での棒グラフで示している。HSIと個体数がよく対応しており、モデルが生物の生息環境をよく表現していることが分かる。

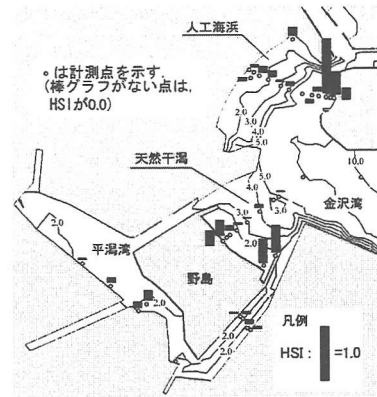
このようにHSIモデルは、生息場の空間特性をよく表現できるが、次に季節変化の評価が問題となる。基本的にHSIモデルは、演繹的手法に基づく生態系モデルのようにバイオマス等を時系列的に追うモデルではない。ただし、次のような適用により、各生物の生活史の個々の段階での評価や場の季節変化を評価することが可能である。

まず、環境の基本量である水温を考えてみる。水温は季節的に変化し、成長や生残の基本因子である。この特性はSIモデルで表現されている。したがって、対象生物の成長に対して最も適した時期と最も厳しい時期にモデルを適用することにより、季節変化に対する場の評価を行うことができる。さらに水鳥のような高次の生物において、生活史の中で産卵場や摂餌の場が異なる場合には、産卵に対するHSI、摂餌に対するHSIをそれぞれ評価し、最後に全体の場としてのHSIを算出することになる。このようにHSIモデルは生息場の季節変化を評価することができる。

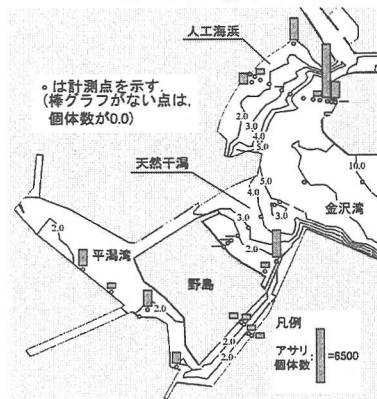
6. 総合環境評価手法の基本コンセプト

沿岸湿地帯の個別構成要素である、ヨシ原、干潟、藻場それぞれの生物環境評価は上記した手法で評価でき、設計に用いることができる。次に必要になるのは、それぞれの所要の広さ、空間的な位置関係などの計画段階で必要となる条件を評価する手法である。特に食物連鎖の高い位置にある鳥や魚などの高等生物については、“縄張り”や“安全”の確保などの要素も加わり、個々の場の広さや形、個別要素間の位置関係などが重要になる。こうした要素を総合的に評価できる手法について考察する。

水鳥について考えてみよう(図-8(a)参照)。まず、水鳥のバイオマスを決定するのに重要な生活史の要素として、ヨシ原における巣づくりと産卵に関するもの(繁殖)、ヨシ原や海面での逃避、休憩、捕食に関するもの(生存)、干潟や海上での採餌に関するもの(成長)の3つの要素を考える。次に、各要素の評価パラメータとして、繁殖率、生存率、成長率を定義し、各々に関わる環境条件により定式化を行なう。具体的な定式化は今後の課題であるが、上記したHSIモデルによる評価結果が基本となる。そして、最終的な指標となる水鳥のバイオマスを繁殖率、生存率、成長率の各パラメータを組み合わせることで算定する。(この算定方法も今後の課題であるが、式(1)と同様な各指標の特性に応じたできるだけ簡易な演算による算定を考えている。)この評価手法は、主体となる場が異なる繁殖、生存、成長の3つの要素が健全に機能するかを評価した上でバイオマスの増減を表現するものであり、沿岸環境の連続



(a) HSI の分布



(b) アサリの個体数の分布

図-7 SI とアサリ個体数の関係¹⁾

性を考慮したものとなっている。

次に、アサリについて考えてみる(図-8(b)参照)。アサリのバイオマスを特徴づける生活史として、産卵、定着、成長、生存の4つの要素を考える。アサリの生活史の要素で特筆すべきことは、産卵後に浮遊幼生を経て定着するプロセスを考慮した点である。このプロセスを考慮に入れることにより干潟において発生した浮遊幼生が遠く離れた別の干潟に定着して成長する現象を評価できるため、内湾における干潟ネットワークの設計に生かすことが可能となる。各要素の評価パラメータ(産卵率、定着率、成長率、生存率)は、水鳥の場合と同様に、関連する環境条件により定式化を行う。最終的なアサリのバイオマスは産卵率、定着率、成長率、生存率の各パラメータを組み合わせることで算定する。

沿岸域の代表的な生物について、上記に示した連続性を考慮した生物生息地指標を構築することになる。対象とする生物種は、水生植物のヨシ、海草類のアマモ、底生生物のアサリ、カニ、ゴカイ、遊泳生物のエビ、ハゼ、ボラ、スズキ、鳥類のシギ、チドリ、カモなどが候補と考えられる。今後、既存データの内容や新たな現地調査の方法なども考慮して、検討対象生物の絞込みを行う必要がある。

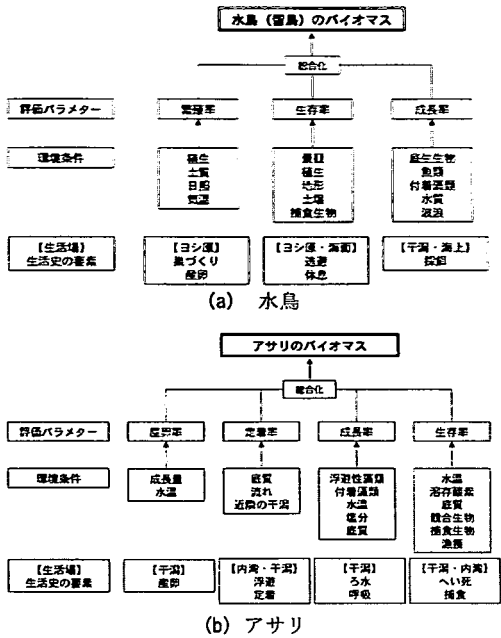


図-8 総合環境評価の概念図

7. おわりに

本研究では、沿岸の自然再生を実現していくために、工学的見地から計画・設計において必要となる環境評価手法について考察した。

まず自然再生の目標として多様な生物の再生産が維持できる“自立した生態系”を挙げ、それを達成するための視点として二つの生態系の連続性に着目した。一つは、局所的な岸沖方向の連続性であり、ヨシ原、干潟、藻場の生態学的な連続性である。もう一つは、特に浮遊幼生期を有する干潟ベントスの再生産過程で重要な空間的に離れた干潟間の連続性、すなわち“干潟ネットワーク”である。ヨシ原、干潟、藻場の個々の場については、代表生物に対する

生息環境評価モデルとして具体的にHSIモデルを提示した。さらに連続性を評価する総合評価手法については、基本コンセプトを提示した。

なお、本手法は当然環境アセスメントなどにも有用な環境評価手法と考えられる。

今後は、総合環境評価手法の具体的な中身を検討していくと共に、“生態系の連続性”を目標とした具体的な造成技術を確立するために、実海域における自然再生の実験が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 新保裕美, 田中昌宏, 池谷 毅, 越川義功: アサリを対象とした生物生息地適性評価, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1111-1115, 2000.
- 2) 新保裕美, 田中昌宏, 池谷 毅, 林 文慶: 干潟における生物生息地環境の定量評価に関する研究-多毛類を対象として-, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1321-1325, 2001.
- 3) 林 文慶, 高山百合子, 田中昌宏, 上野成三, 新保裕美, 織田幸伸, 池谷 毅, 勝井秀博: 沿岸域における複数生物の生息地環境評価-生態系連続性の配慮に向けて-, 水工学論文集, 第46巻, pp. 1193-1198, 2002.
- 4) 風呂田利夫: 内湾の貝類, 絶滅と保全-東京湾ウミナガシの衰退からの考察, 月刊海洋, 号外20, pp. 74-82, 2000年.
- 5) 秋山章男, 松田道生: 干潟の生物観察ハンドブック, 東洋館出版社, 1974.
- 6) 財団法人リバーフロント整備センター(編): 川の生物図典, 山海堂, 1996.
- 7) 沼田 眞, 風呂田利夫: 東京湾の生物誌, 築地書館, 1997.
- 8) 栗原 康(編著): 河口・沿岸域の生態とエコテクノロジー, 東海大学出版会, 1988.
- 9) 和田恵次: 干潟の自然史-砂と泥に生きる動物たち-, 生態学ライブラリ-11, 京都大学学術出版会, 2000.
- 10) 佐藤正典: 有明海の生きものたち, 干潟・河口域の生物多様性, 潮海遊舎, 2000.
- 11) Division of Ecological Services U.S. Fish and Wildlife Service: Habitat Evaluation Procedures, 1980.

(2003. 1. 6 受付)

A STUDY ON HABITAT EVALUATION PROCEDURE FOR PLANNING AND DESIGNING THE RESTORATION OF COASTAL WETLAND

Masahiro TANAKA, Seizo UENO, Boon Keng LIM, Yumi SHIMBO and Yuriko TAKAYAMA

A new concept of habitat evaluation procedure for planning and designing the restoration of coastal wetland was discussed. Establishing an independent coastal ecosystem is suggested as a goal of the restoration of coastal nature. Two important concepts were suggested. One is the ecological inter-relations among reed field, tidal flat and seagrass bed. The other is the ecological network among remote coastal wetlands, which is important for the reproduction process of benthos on the larval planktonic stage. Habitat suitability index models for reed, short-necked clam, lugworm and fiddler crab were already developed by authors as the representative organisms of coastal wetland. A basic idea for the model evaluating the ecological relations among these components were presented.