

ニューラルネットワークを利用したアマモ場 造成手法に関する研究

松原雄平*・野田英明**・依藤正典***・中谷英明****

1. はじめに

東京湾や大阪湾や瀬戸内海など、わが国の大都市に面した沿岸域では長期間にわたって埋め立てが進み、生物の生息空間は確実に減少し、生息生物にも大きなインパクトを与えている。同時に、内湾、内海域の水質汚濁も進み、生物生産量も低下傾向にある(相崎, 1993; 沖野, 1993)。こうした問題に対処するために、沿岸域に人為的に藻場を形成し、その生物涵養機能ならびに浄化機能によって、水域を再生させようとする生態系環境修復事業が進みつつある(福田, 1987)。湖水面積 104 km²、湖岸線距離 83 km、最大深度 9 m の水域を有する中海においても、同様の目的で、捨て石マウンドを使った修復が進められつつある。同水域において昭和 38 年に始められた国営中海土地改良事業は、水域内の 5 地区 2,540 ha を干拓し、中海、宍道湖の残水 15,300 ha を淡水化するというもので、本庄地区を除いて、すでに干拓が終了し、その後計画は凍結されている。干拓が行われる前の中海には多くの干潟が存在し豊かなアマモ群落が形成され、エビ、カニの育成場、ハゼやスズキの好漁場として優れた環境が存在していた。中海での干拓事業は、浅瀬・藻場の消失をもたらすと同時に、湖水域への雑排水の流入によって水質の悪化と湖底へのヘドロの体積をもたらした。現

在、湖水域での漁獲量は往時の 6 分の 1 にまで減少している。図-1 は、アマモ (*Zoeta marina*) 場の造成が進められている中海水域を示したものである。現在、同図に示す水域に 3 基の捨て石マウンドが形成されアマモが移植されている。こうしたアマモ場造成は、わが国のいくつかの県で環境修復事業として行われてきたが、成功に至った例はほとんどないといえる。これはアマモの生態や生息条件はこれまでの研究でかなり明らかになりつつあるものの、藻場造成後から藻が完全に定着するまでの継続的な調査研究がなされていないことや、造成地での食害生物とアマモとの関係が不明なことによるものと考えられる。この研究では、中海水域で行われているアマモ場に関する調査結果について述べるとともに、過去に全国で行われたアマモ場造成事業に対するアンケート調査を実施した結果について報告する。さらにその結果をもとにニューラルネットワークを構築し、アマモ場造成に必要な物理的・化学的環境条件を抽出し、合理的な藻場造成手法を提案しようとするものである。

2. アマモの生態と生息条件

2.1 アマモの生態

アマモは、単子葉類、オモダカ目、ヒルムシロ科、アマモ属の海産性顕花植物で、北半球の温帯を中心に日本の南九州を南限として分布している。冬に発芽し初春に開花し春に実り種は海底におちて夏まで生長する。夏過ぎに衰退し 11 月盛んに枝分かれます。太陽光で光合成を行い海中の窒素分を葉や地下茎に吸収し、枝分かれによって増える植物である(川端, 1993)。また相生 (1986, 1989) はアマモの生育環境条件についてまとめ、なかでも環境因子として光量子は重要であり、表面相対照度で 20% 程度以上あればアマモは形成可能であること、底質条件として泥底から砂底までの広範な底質条件に対して生息すること、水温は 27℃～

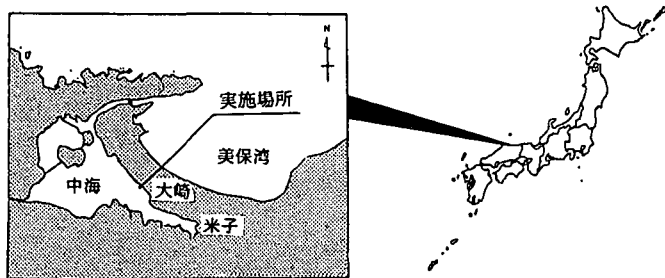


図-1 中海と実施位置図

* 正 会 員 工 博 鳥取大学助教授
 ** 正 会 員 工 博 鳥取大学教授
 *** 学生会員 鳥取大学大学院
 **** 正 会 員 鳥取県農林水産部

29℃が生息限界であること、さらに塩分濃度が 2.7‰～32‰の範囲であればアマモは生息できることなどを明らかにしている。

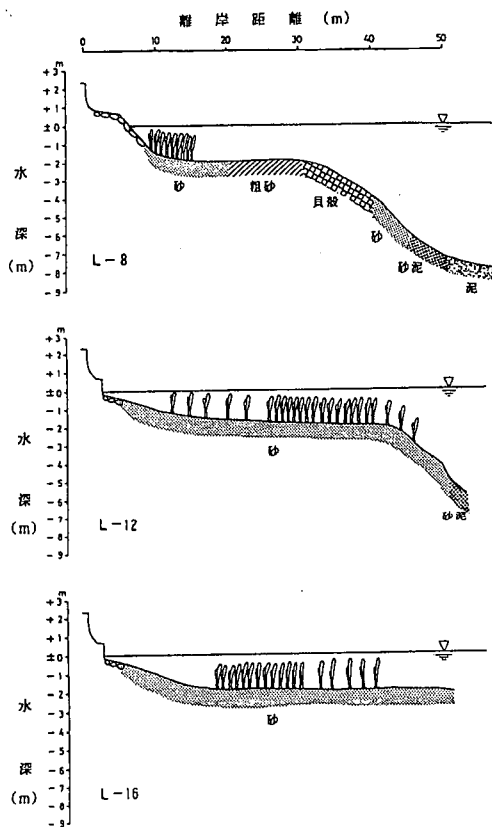


図-2 アマモ繁茂地のライン調査結果

2.2 アマモ繁茂域の生息環境調査

中海水域には境水道東側沿岸部一帯にアマモ群落が繁茂している。このアマモ群落で各種の環境調査を行い、アマモの同水域内での生息状況を調べた。調査は、現繁茂地の海底地形、アマモの生息状況、物理条件、水質条件、底質条件を調べるものである。調査場所は、鳥取県境港市外江地区 40 m×300 m の区域である。調査は、アマモ繁茂地を汀線と直角(岸沖)方向に 40 m、汀線方向に 300 m の区間を 20 m 間隔で、潜水調査による繁茂状況調査を行うとともにアマモの個体別葉長、個体数および実生本数を観測・調査した。生息密度については、1 m² に換算している。図-2 はライン調査結果の一部であって、アマモ繁茂部 L-8, 12 および 16 の海底断面地形と植物の繁茂状況を示している(鳥取県, 1995)。この結果から、アマモの生息条件として以下のことが見いだされる。

- (1) 生息地の水底勾配は、比較的緩やかで、底質は、砂質あるいは貝殻まじり砂質であること
- (2) 護岸の形式としては、自然護岸あるいは通常の捨て石護岸でもよい
- (3) アマモは、水深帯 1 m から約 2 m の範囲に繁茂し、それ以深には自生しない。

この他に調査全域から得られた結果を示すと、当該地区の 1 m² 内の換算株数は 44 本から 80 本、葉長は 10 cm から 70 cm の範囲であった。さらにこれらの調査結果の季節変化を調べたところ、平均株数は、10 月から 2 月にかけて密生範囲が広がるとともに実生の個体が生育し、総面積が増加することなどが明らかになっている。以上のことから、中海水域のアマモは、6 月から 2 月までを繁茂期とし、それ以降を衰退期としながら季節的に株数の増減を繰り返しつつ、一定の個体数を維持していることがわかった。また、アマモ場での流速観測からは流速変動範囲が 88.8 cm/s~12.2 cm/s とかなり大きいことが分かった。これは繁茂地が中海の河口部に近い場所に位置しているため潮位変化の影響も含まれていると考えられる。この繁茂地での観測結果から、比較的大きな流速が生じる砂質の区域でもアマモが十分に地下茎を伸ばしていれば、アマモの生長は可能であるといえる。

3. アマモ場造成事業に関するアンケート調査

3.1 アンケート項目

現在、アマモ場造成に関しては各地方自治体で多くの事例が試験的に進められつつある。しかし、調査データは一般には公開されず全国的に造成事例のデータを分析した例もないようである。そこでこれまでアマモ場造成を行ったことが判明した機関にアンケート方式で造成事業に関する調査を試みた。アンケート項目は以下に示すような 15 項目で、それぞれ、(1) 造成場所(海岸、河川あるいは湖沼)、(2) 造成場所の水深、(3) 基盤整備の有無、(4) 潜堤の有無、(5) 造成地点の水底勾配、(6) 底質改良の有無、(7) 底質組成、(8) 造成方法、(9) 平均流速および波高、(10) 造成地点への波浪影響の有無、(11) 造成水域での塩分量、全リン、全窒素の化学的環境データの処理、(12) 造成地の平均光量、平均水温、(13) 砂面変動量、(14) アマモの平均株密度平均葉長、(15) 水域汚染の有無、である。

3.2 アンケート調査結果の概要

アンケートは全国の 14 の地方公共団体の藻場造成事業担当部所に送付した。回答は 11 例で、79% の回答率である。アンケートの回答から以下での検討対象となったのは、鳥取県の中海地区、広島ならびに香川県沿岸部の瀬戸内地区、熊本県ならびに鹿児島県の九州西岸地区の各地区の 40 造成事例である。アンケート結果をみると、前節で示した物理環境ならびに化学的環境指標に対して、前者に対しては回答があるものの後者の化学的環境条件に関する回答は十分に得られなかった。造成事例 40 ケースの結果から、底質の粒度組成、光量、塩分量、水温ならびにアマモ生成密度について概要を示すと次のようである。図-3 は、アンケート回答結果から得られたア

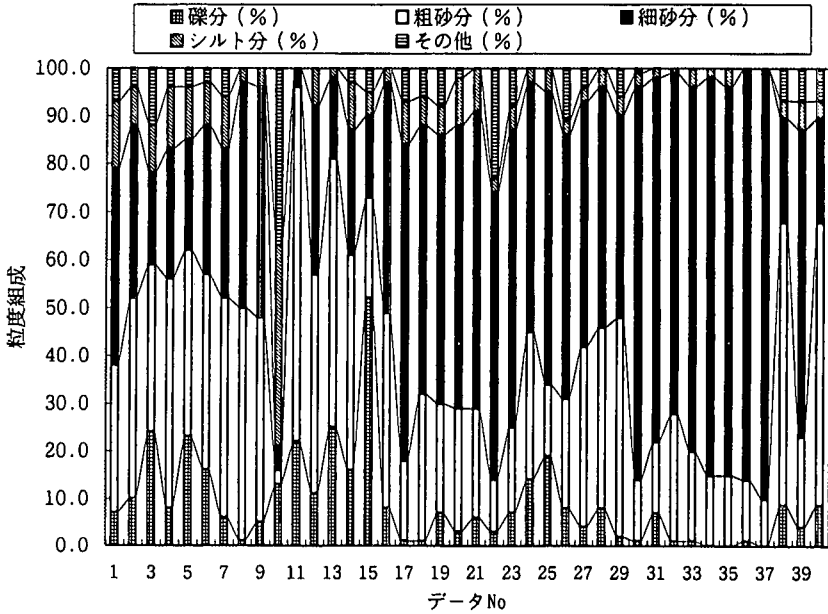


図-3 アマモ造成地の底質粒度特性

アマモ造成地 40 点での底質粒度特性を示したものである。これよりアマモが造成されている水域の底質粒度組成は、大半の造成地域で粗砂と細砂から構成され、粗砂が相対的に多いことがわかる。光量と塩分量の範囲は、それぞれ $3.0 \text{ E/m}^2/\text{日}$ 以上ならびに 18% 以上であった。年間の砂面変動量は、最大の事例で 7 cm 以下で、大半が 3 cm 程度と砂移動の少ないところに造成されていること、水温は、最高水温が夏季で 24°C で最低水温が 8°C となっている。以上の各地の造成条件は、光量、塩分、砂移動量ならびに水温に関しては、ほぼ相生の示した生息条件の範囲に入っている。しかしながら造成されたアマモの株密度をみると、 $0 \sim 160 \text{ 株/m}^2$ の範囲で変動していることから、上記の造成環境条件とは別の物理的あるいは化学的要因が影響していると考えられる。

4. ニューラルネットワークによるアマモ場環境の評価

4.1 ニューラルネットワークの構築

ニューラルネットワークによりシステムを構築するには、ネットワークの学習データとしての環境調査データと、それに基づいて適正に評価された結果を格納するデータセットが必要となる。これらのデータは、学習のための入力データであるため、教師データと呼ばれる。本解析での教師データには、前述の中海ならびに瀬戸内海域での調査データ及び各都道府県の水産試験場のデータを用いた。これらの調査データは、各アマモ造成事業試験場の沿岸や湖沼での調査結果であり、主として海底

特性や物理的環境条件データと、塩分量等の化学的環境条件データとから成っている。解析に使用した調査データは、全部で 40 ケースであり、そのうち 35 ケースのデータを学習用データとし、残りの 5 ケースのデータをニューラルネットワークの検証用データとした。説明変数としての項目は以下の 22 個である。まず地形・物理的環境条件として (1) 造成位置 (海岸、河川、湖) (2) 水深 (3) 基盤整備の有無 (4) 潜堤の有無 (5) 水底勾配 (6) 底質改良の有無 (7) 礫分 (8) 粗砂分 (9) 細砂分 (10) シルト分 (11) 造成方法 (12) 平均流速 (13) 波浪の影響の有無 (14) 平均波高の因子が物理的環境条件である。化学的条件としては (15) 塩分量 (16) 全窒素量 (17) 全リン量 (18) 均光量 (19) 砂面変動量 (20) 平均水温 (21) 平均葉長 (22) 汚染現象の有無の各項目である。

一方、上記の環境因子の変化によって影響を受ける因子すなわちニューラルネットワークの評価項目はアマモの株密度とした。すなわち環境条件の変化に伴うアマモ造成後の株密度をランク A からランク C までの 3 段階に評価し出力させた。ただし、ランク A～C の評価基準としては、アマモの最大株密度に対する各データの株密度の割合で示すこととし、密度の高い順にランク A: 55% 以上、ランク B: 55%～25%、ランク C: 25% 以下とした。すなわちランク A は、収集されたアンケートデータの中の最大株密度の半分以上と高く環境的には好ましい状況にあり、一方ランク C は、最大株密度の 25% 以下で物理的あるいは化学的環境因子の影響によって生息環境

としてはふさわしくない状況にあることを示している。ここで採用したニューラルネットワークは、階層型ネットワークで、誤差の評価はバックプロパゲーション法によった(松原, 1994)。最適なネットワークを探索するため、ニューラルネットワークの層数を3層、4層および5層モデルで変化させ、その中で細胞数を変えた計22種のモデルを構築した。個々のモデルの学習回数は10000回に固定した。まず35ラインのデータを与えて学習させた後、未学習のデータ5ケースに対するネットワークのアマモ密度の認識結果と正解値との比較で認識率を検証した。

4.2 ニューラルネットワークによる認識結果

まず中間層数の違いによる認識率の差について検討した。中間層を3層、4層そして5層と層数を増やすにつれて、認識誤差と正解値との平均二乗誤差が増大し、認識率が低下することが分かった。そこで3層モデルに絞り、その中で最も認識率の高いモデルを調べたところ、入力層22細胞、中間層10細胞そして出力層3細胞が最も認識率が上がるということがわかった。認識率は5ケースのデータに対して正しく認識した結果が3ケースとなり認識率は3/5(60%)となった。さらに認識率を向上させるために学習回数を20000回まで増大させたところ認識率は4/5(80%)まで向上した。この後、学習回数の増大は認識率の向上には繋がらなかった。表-1は、最終的に得られたネットワークモデルに対して検証用の5ケースのデータを入力して、ネットワークの評価と実測の値(正解値)とを比較したものである。ランクCに判定されたデータNo.5およびNo.6については、ネットワークも正しくCランクに認識している。またランクAに判定されたデータNo.28、No.34のデータに対しても、ネットワークは同様に高い識別率でAランクに認識している。一方、ランクBに判定されるデータNo.27については、ネットワークの出力はBランクであるが、出力値をみるとA、Bランクほぼ同程度で、わずかにランクAが高いことがわかる。両者に優位な差異はないと考えれば、ここで構築したネットワークは高い認識力を有しているといえる。以上のことから、認識するネットワークの構造は、必ずしも複雑なものが良いとはかぎらず、むしろ簡

単な構造を与えてネットワーク内の細胞数あるいは学習回数を変えて正解率を検討する方が認識率の高いネットワークを得られるといえる。また今回の入力データはアンケート結果から得られたもので化学的データの欠如や広範な要因の抽出がなされていないにもかかわらず、認識率の高いネットワークが得られた。

4.3 感度解析

生息環境の改善のためには、どの環境因子がどのようにアマモの株密度に影響を及ぼすかを知ることがある。そこで以下の手順によって感度解析を行った。

- (1) 株密度に影響を及ぼすと思われる環境因子(卓越因子)について、Aランクとなる入力データの中での最大値と最小値の差を10段階に等分する。
- (2) 他の環境因子については、Aランクとなる因子の平均値を求めておく。
- (3) 段階分けされた卓越因子ならびに他の平均化された環境因子をニューラルネットワークに入力し認識させる。
- (4) ネットワークの認識結果を縦軸として、卓越因子の入力値を横軸として感度解析のグラフを作成する。

4.4 感度解析による結果

前節で得られた最も認識率の高いネットワークを利用して、各環境要因が出力としての株密度に対する影響度すなわち因果関係を調べた。図-4に示す各図は、前述の方法で得られた、塩分量、底質のシルト分ならびに水温の各要因とアマモの株密度との関係を示したものである。縦軸は株密度がAランクあるいはBランクと正規化されて出力される値を示し、横軸はそれぞれの要因の値を次元量で示している。塩分量の影響を示した(a)では、20%を過ぎるとランクAが上昇し、ランクBは減少している。これは、必要な塩分量は最低20%程度であること、それより塩分量が多い場合はアマモの生息に好ましいことを示している。またシルト分の結果からは、5%以上混在するとAランクが低下しからBランクが上昇すること、すなわち株密度は低下することを示している。特に10%以上シルト分が混在するとBランクが卓越し藻場環境としては好ましくないといえる。一方、水温について検討すると、ネットワークの結果は9℃以上の水温は好ましくなくないことを示しており、従来提案されている造成水温条件(7℃以上であること)とは一致していない。しかし底質条件(シルト分を含まない砂質であること)ならびに塩分量条件(17‰を下限とする)については、これまで提案されている条件にほぼ一致している。このほか、砂面変動量や粒度組成の条件についても、ほぼ従来の条件とほぼ一致する結果を得た。以上のことから本研究で導いたアマモ場環境評価ニューラルネット

表-1 アマモ場環境評価ネットワークの認識結果

モデル No.	42				
データ No.	5	6	27	28	34
A ランク	0.000	0.000	0.609	0.991	0.930
B ランク	0.204	0.000	0.589	0.199	0.199
C ランク	0.908	0.999	0.005	0.001	0.001
正 解	C	C	B	A	A

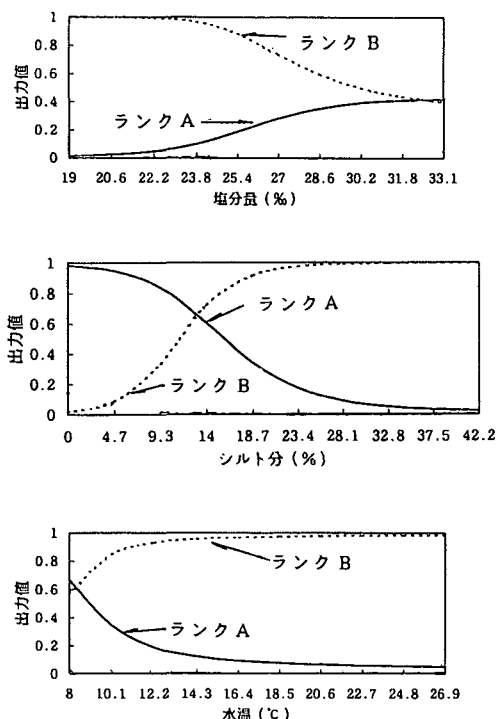


図-4 塩分量, シルト分, 水温の感度解析結果

ワークを利用した感度解析によって、従来の造成条件を定量的に再検討することができること、また、必要とされる株密度を達成するために、どの程度の各環境要因が必要とされるのかについて定量的に示しうるため、アマモ場造成条件を考える上できわめて有力であることがわかる。

5. おわりに

以上、中海ならびに全国の沿岸域において行われている各種のアマモ場環境調査結果をもとに、アマモの生息条件について検討した。現段階で得られている結果をまとめると以下のようである。

- (1) アマモは、比較的緩勾配あるいは水平の水底勾配で、砂質の領域で生長する。
- (2) アマモの生息水深は、光が十分に透過する水深 2 m 程度である。

- (3) アマモ場は、底質の移動が生じない程度に流れが緩やかであることが望ましいが、比較的大きい流速でも、その出現頻度が小さく、かつアマモの地下茎が発達しておれば、繁茂は可能である。
- (4) アンケート結果をみるかぎり、全国で行われているアマモ場造成は、アマモの生息条件に適したものであることがわかった。

- (5) ニュラルネットワークを利用したアマモ場環境評価モデルは、高い認識率を示した。また、そのモデルで感度解析を行うことで、アマモ場造成に必要な環境条件を提示しうることが分かった。

今後アマモ場の造成法とアマモ株の移植法ならびに現地での競合種の発生をいかに押さえるかについてさらに現地調査ならびに実証的研究を続け、合理的なアマモ場造成条件と管理方法を提案する必要がある。

謝辞：本アマモ場造成事業は、鳥取県の中海漁場整備開発事業の一環で行われたもので資料の提供を頂いた鳥取県農林水産部に謝意を表する。また東京大学海洋研究所の相生先生には、アマモの生態に関して有益な助言を頂いた。ここに記して深謝の意を表する。

また本研究の一部は、日本生命財団の「人間活動と環境保全との調和に関する研究」助成によって行われたことを付記し、ここに深甚の謝意を表する。

参考文献

- 相生啓子 (1986): 海草の生態とその保護 (沿岸の浅海に生える海の水草), 採集と飼育, pp. 352-356.
- 相生啓子 (1989): アマモの生育環境, 水草研究会会報, 37 号, pp. 5-7.
- 相崎守弘 (1993): 湖沼の富栄養化の現状と対策の問題点, 環境と公害, Vol. 23, No. 2, pp. 10-22.
- 沖野外輝夫 (1993): 湖沼の損傷と再生, 環境と公害, Vol. 23, No. 2, pp. 1-8.
- 川端豊喜 (1993): アマモ場造成に関するアマモの生態学的研究, 長崎大学学位論文, 180 p.
- 鳥取県 (1995): 中海藻場造成事業前調査委託業務報告書.
- 福田富男 (1987): アマモ場造成に関する研究-VIII 播種によるアマモ場造成手法, 岡山水試報, pp. 35-37.
- 松原雄平 (1994): ニュラルネットワークを用いた環境要因評価法, 土木学会, 海洋開発シンポジウム論文集, Vol. 10, pp. 142-143.