

遺伝的アルゴリズムを用いた 物理的環境に基づくアマモ場状況の再現

中瀬 浩太¹・鶴飼 亮行²

¹正会員 五洋建設（株）環境事業部
（〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8）

E-mail: kouta.nakase@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設（株）技術研究所
（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）

E-mail: akiyuki.ukai@mail.penta-ocean.co.jp

アマモ場造成は環境修復やブルーカーボンにより注目されている。アマモ分布適地は水深やシールズ数等のパラメーターの範囲より評価されるが重回帰式等の方法を試みたものの再現は困難であった。

そこで、アマモ分布と物理条件が同一メッシュに存在する既存のデータを用いて、被度・草丈に対する各条件を折れ線関数で表せるとし、これを構成する数字列を遺伝子情報と見立て、これらの選択・交配・突然変異の操作を繰り返して最も優れているもの抽出する遺伝的アルゴリズムにより関数の当てはめを行った。10万回の試行により被度・草丈分布が定性的に再現できたが、推定元のデータにアマモ非分布域が多く、群落状況の定量的評価には課題が見られた。

Key Words : eelgrass bed, Status of community, planar distribution, physical parameters, genetic algorithm

1. はじめに

沿岸域において、二酸化炭素固定という観点からアマモ場造成に注目が集まりつつある¹⁾。アマモ場造成については、1980年代より技術開発が進められ、現在では各種のガイドラインなどが公表されている²⁾。しかしながら、アマモ場を造成しようとするとき、ガイドライン等に沿って実施すれば、確実に造成されるとは限らない。アマモ場造成技術は、未だに完成段階にあるとは言えない。これはアマモ場成立条件についての理解が不十分であること、および推定した各条件によるアマモ場分布の再現が不十分であることによると考えられる。

アマモ場が成立する条件については、先に述べたように、多くの調査事例より、例えば表-1に示すように、光条件・水質・底質・波浪などの各要素別に、その範囲が示されている²⁾。

これらの各条件を用いて、各条件の分布範囲よりアマモ場分布場所を推定する方法や、各条件別にアマモ場のSIモデルを作り、これらを統合したHSIモデルで評価するHEPによりアマモ場が分布可能な場所を推定して、アマモ場の評価や造成あるいは保全の計画が行われている^{3,4)}。

しかし、多くの検討事例ではアマモ場分布可能な場所を

表-1 MF21ガイドラインによるアマモ場分布条件²⁾

	アマモの条件
光量子量	純光合成光量 $I_n = I_d - I_c \geq 0 \text{M/m}^2 \cdot \text{day}$, $I_n = I_d - I_c$ (I_d : 水深 d (m)の日積算光量, I_c : 日積算補償光量) 水面直下の光量子量の10%
透明度	透明度水深
水温	8月の平均水温 $\leq 28^\circ\text{C}$
塩分	17~34
海底地形	透明度の2倍以内の水深水域が広域に存在
波浪	シールズ数 $\phi \leq 0.2$ 波高0.5m以下
流速	60cm/s
砂面変動	10cm以下
底質	$0.14\text{mm} \leq d_{50} \leq 0.39\text{mm}$ 細粒分30%以下 I.L. $\leq 5\%$, COD $\leq 10\text{mg/g}$, T-S $\leq 1\text{mg/g}$

再現しており、アマモ分布の最適な場所や群落の状況まで評価した事例は少ない。

またHEPに用いるSIモデルは対象生物分布の各パラメーター別の大まかな分布包絡線を示したに過ぎず、HSIはこれを重ね合わせたものである。アマモ場が存在している場所は、その範囲内でも主な分布制限要因になる条件が異なる場合や、各条件の相互関係が影響してアマモの被度や草丈が変化することが考えられる。そして、これらの関係はそれぞれのパラメーターの区間ごとに变化してゆくことも考えられる。



図-1 使用データの取得地点^{注1)}により作成

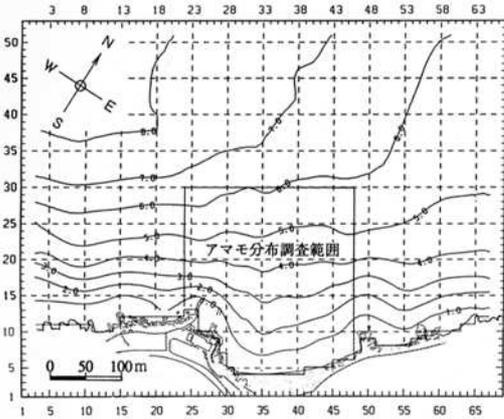


図-2 アマモ調査メッシュ

そこで、HEPにおけるSIモデルに相当する、各種パラメータとアマモの有無のみならず被度や草丈との関係について、AI手法により任意に分割した範囲で最も相関が高い部分を試行錯誤的に繰り返し、各条件別のアマモ分布状況を抽出し、アマモ分布状況の再現を試みた。

2. 使用したデータ

この検討では過去に図-1に示す千葉県富津市地先で実施された物理量数値計算結果と同一計算メッシュのアマモ分布状況を調査したデータを用いた⁵⁾。

物理的条件は図-2に示す調査地点の岸沖方向480m汀線平行方向640mについて10m×10mの計算メッシュを設定し、波浪条件は当該海域の未超過確率90%に相当する $H_{1/3}=1.0m$, $S=4s$ を与え、3次元海浜変形予測モデルにより再現計算した波高・海浜流・シールズ数・地形変化量を用いた。これらの平面分布を図-3に示す。

アマモ分布の情報は、1990年12月、1991年1月の衰退期と1991年6月の繁茂期に、再現計算範囲内のうち岸沖方向160m汀線平行方向260mで実施した潜水調査結果を用いた。この調査では10m四方の計算メッシュの中心に2m四方のコドラートを配置し、その内部の被度・草丈の状況を10m四方のメッシュの情報としている。アマモ被度は図-4に示すブロン・ブロンケによる全数推定法による被度階級⁶⁾で表されていた。この被度階級を既存文献⁷⁾を参考に、被度5から2は被覆面積

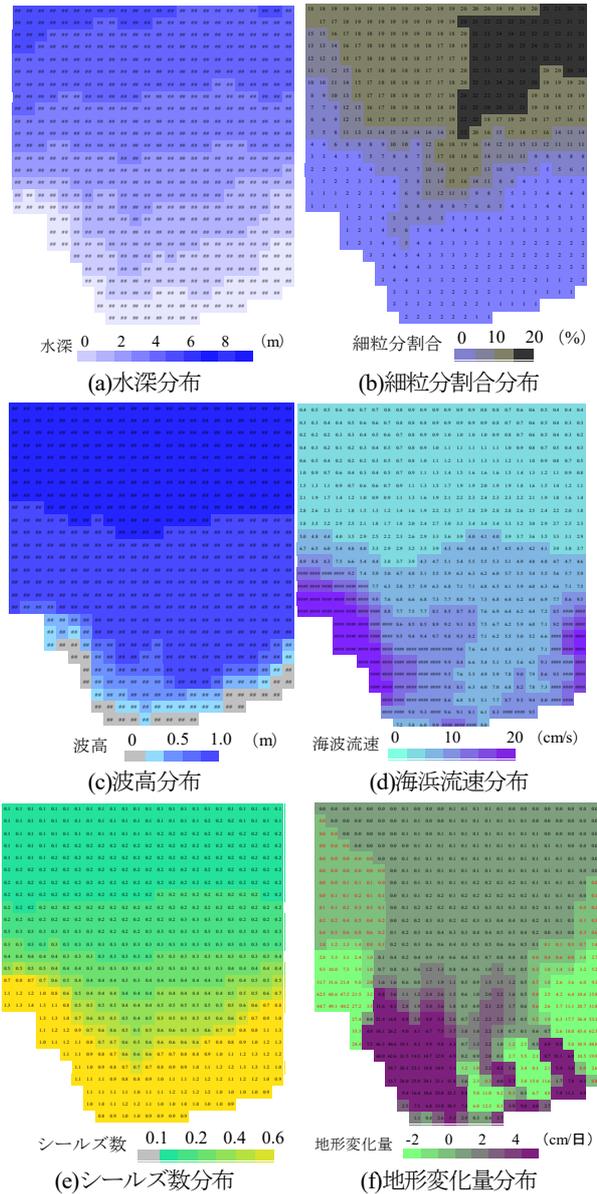


図-3 検討範囲内のパラメータ分布

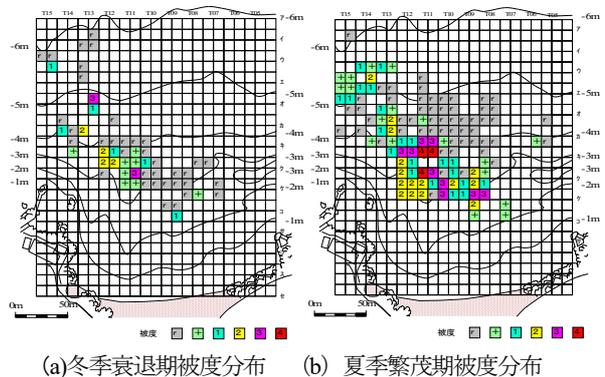


図-4 被覆度調査結果

示す範囲 (%) を単純平均したものを各被度階級の被覆面積の代表値 (%) として設定し、被度1, +, および r は、被覆面積割合と観察者の主観により設定して数値化した (図-5)。

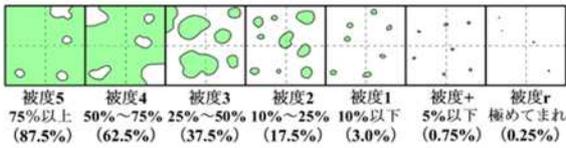


図-5 ブロン・ブロンケによる被度階級の定量化

表-2 重回帰式の偏回帰係数および相関係数

説明変数	被度		草丈	
	夏季	冬季	夏季	冬季
水深 (m)	-2.245	-0.041	-0.199	-0.058
細粒分 (%)	0.032	-0.029	0.013	0.000
海浜流速 (m/sec)	0.109	0.004	0.007	0.003
シールズ数	-9.961	-1.211	-0.862	-0.325
地形変化 (cm/day)	0.015	-0.002	0.001	0.000
波高 (m)	8.769	-0.134	0.577	0.197
定数項	5.848	1.390	0.633	0.236
重回帰係数 (R)	0.159	0.078	0.259	0.204
P < 0.01	0.01 < P < 0.05		P > 0.05	

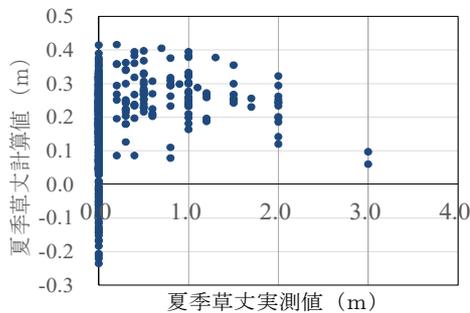


図-6 アマモ調査メッシュ

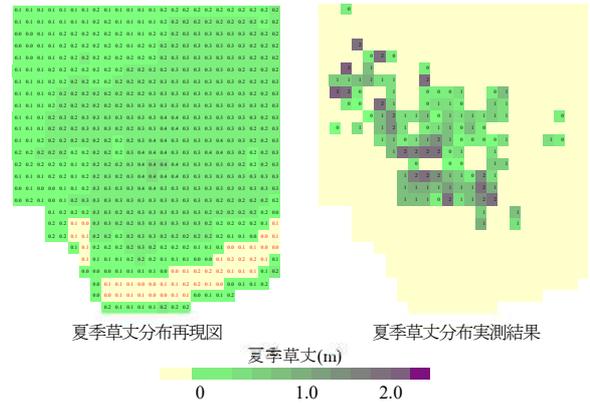


図-7 重回帰式によるアマモ草丈分布の再現

$$f_i(x_i) = a_{i,j}(x_{i,j} - L_{i,j}) + b_{i,j}$$

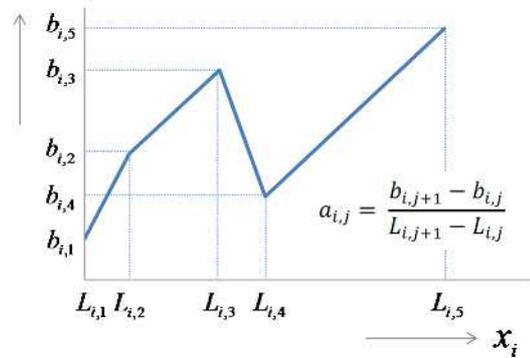


図-8 折れ線関数のイメージ

3. パラメーター寄与率の検討

調査範囲内のアマモ分布を再現するため、各種の条件を用いて、目的変数をアマモ被度および草丈として、重回帰分析を行った。目的変数は正規分布をとる連続変数でなければならないが、被度や草丈は必ずしも正規分布をしていないが、どの説明変数がアマモ分布に寄与しているかを評価することは可能と考えた。説明変数には外力条件の他に、水深 (T.P.=0.0m)と、岸沖方向で変化が見られた底質中のシルト以下含有割合 (%) を用いた。

計算範囲内のアマモ分布が見られない部分も含んで水深、シルト以下割合、波高、海浜流速、シールズ数、地形変化量を説明変数に、夏季と冬季の被度および草丈を目的変数として重回帰式を求めた。それぞれの変数ごとの偏回帰係数および回帰式の相関係数を表-2に示す。

回帰式の当てはめは極めて低く、最も重回帰係数Rが大きな夏季草丈を示す重回帰式でも図-6に示すように計算値と実測値のプロットは大きく乖離しており、この回帰式を用いた場合の草丈分布の平面的再現結果も、図-7に示すように測定結果を再現していない。このため、通常の重回帰式ではアマモの分布は再現できないと考えられた。

4. 遺伝的アルゴリズムによるパラメーターの評価と分布の再現

(1) 遺伝的アルゴリズムを用いた方法の概要

HEPにおけるSIモデルは、対象生物分布の各パラメーターでHSIはこれを重ね合わせたものであるが、ここではこれを参考にアマモの草丈や被度 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ に対しSIモデルのように各パラメーターの寄与度の関数 $f_i(x_i)$ を重ね合わせることで直接的に推定するモデルを考えた。

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i(x_i) \quad (1)$$

ここで、 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ はアマモの草丈または被度の推定値、 $f_i(x_i)$ は*i*番目の物理環境 x_i の寄与度を表す関数でSIモデルを参考に折れ線関数を用いた。なお、 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ は、草丈や被度としてとり得る値の範囲となるよう補正をした。 α_i は*i*番目の物理環境パラメーターの重みである。折れ線関数は、各環境パラメーターの出現する範囲を複数に分割し、その区間を連続の線形関数でつなげたもので、複雑な形状を表現できる関数であることを図-8のイメージ図で示す。

各区間毎の折れ線の線形関数は、次式とする。

$$f_i(x_i) = a_{i,j}(x_{i,j} - L_{i,j}) + b_{i,j} \quad (2)$$

ここで、 $L_{i,j}$ は物理環境 x_i を m 区画に分割したときの境界値である。 $b_{i,j}$ は、 j 番目の境界値 $L_{i,j}$ における $f_i(x_i)$ の値で、 x_i がある区画内 $L_{i,j} \leq x_i < L_{i,j+1}$ ($j = 1, 2, \dots, m$)にあるとき傾き $a_{i,j}$ は、

$$a_{i,j} = \frac{b_{i,j+1} - b_{i,j}}{L_{i,j+1} - L_{i,j}} \quad (3)$$

となる。この折れ線関数は、任意の区画ごとに異なる関数を組み合わせているので重回帰分析などの一般的な方法で係数を決定することができない。このため、ここでは最適化のために多く用いられている遺伝的アルゴリズムを用いて係数を決定した⁸⁾。

遺伝的アルゴリズムは、遺伝子の進化を模擬して最適化を進める方法で、**図-8**に示したように折れ線関数を4区画に分割し、その5つの節点の値 $b_{i,j}$ を0と1の羅列で表しこれを遺伝子情報として扱う。1つ節点の値を-100~100の範囲とし、10個の0または1で与える。節点数が5つなので1つのパラメータを表す折れ線関数は50個の0または1で表される。アマモの草丈や被度は、重回帰分析の場合と同様に6つのパラメータを用いて表すので300個の0または1の数字の羅列を遺伝子情報と考える。これに6つのパラメータそれぞれの重みの情報を加えて360個の数字の羅列を1組の遺伝子情報として扱う。なお、各パラメータの区画を決める $L_{i,j}$ は、そのパラメータの実測値の範囲内で扱うデータ数が各区画で同等となるよう決めている。

この数字の羅列を遺伝子の進化を模擬した手順で変化させ、設定した評価基準に対してよりよく適合する数字の組み合わせを求めていく。

進化の手順は、始めにランダムに与えた360個の0または1を20組用意し、これを1セットとし、それぞれに実測値として草丈や被度が確認されている地点のデータにそれ以外の確認されていない地点を草丈や被度の値を0としてデータに加えた562地点の6つのパラメータのデータセットを当てはめる。推定された草丈または被度の値と実測値を比較し、誤差の大小でランクをつける。このとき、下位2組を捨て、上位2組の遺伝子情報の一部を交換(交配)して出来た2組の遺伝子と置き換える。また、ランダムに選択する1組について、遺伝子情報の一部の0と1を入れ替える「突然変異」をさせることで次の世代の20組を作成する。これを繰り返すことで、誤差の小さい折れ線関数が求められて行く。このように遺伝的アルゴリズムによって得られる結果は、偶発的な試行によるものなので、必ず最適解が得られるわけではな

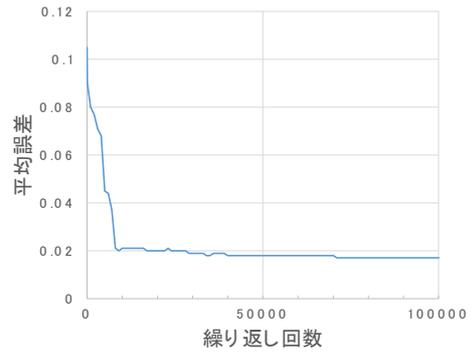


図-9 繰り返しによる誤算の変化

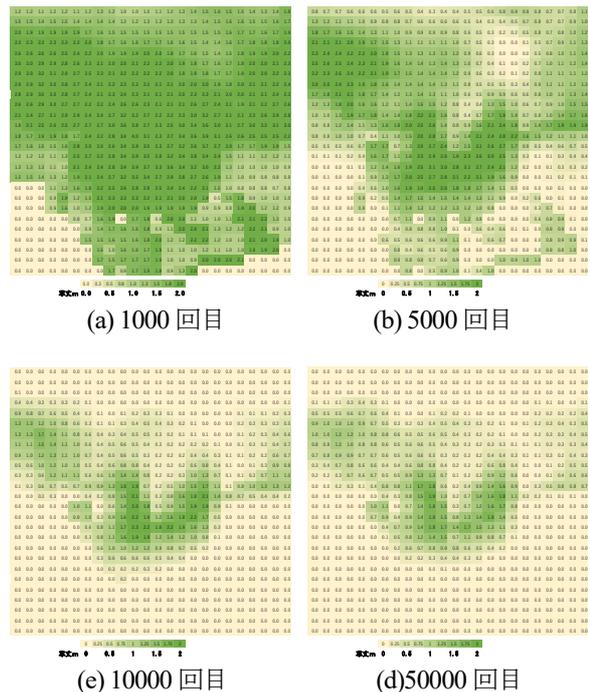


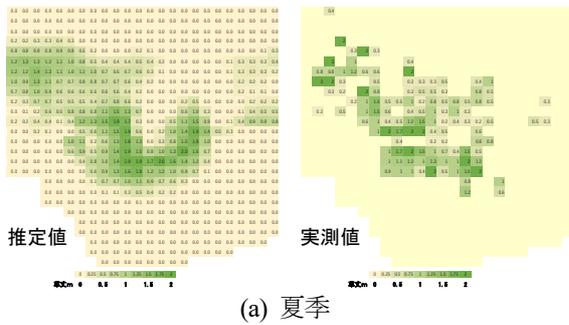
図-10 アマモ草丈平面分布最適化の過程

い。今回は、10万回の世代交代をさせた中で、最も誤差の小さかった結果で折れ線関数を決定した。

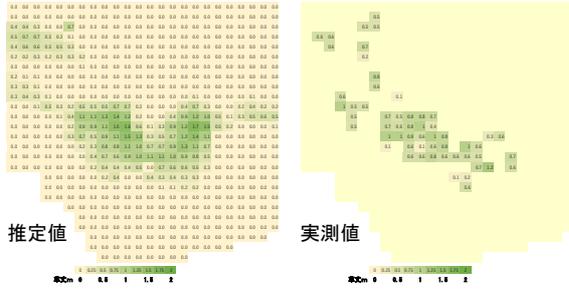
図-9に繰り返し過程における平均誤差の変化を示す。5千~1万回程度で誤差が大きく減少した後は少しずつ誤差の低下がみられるものの10万回までの繰り返しで大きな改善が見られなかったので繰り返し回数はこまめとした。**図-10**に繰り返し回数1千、5千、1万、5万回の草丈の平面分布を示す。進化を繰り返すことで徐々に実測値に近いものに変化していることが分かる。

(2) 平面分布の再現結果

10万回の繰り返し結果から得られた草丈の平面分布と実測値の比較を**図-11**に、被度の比較を**図-12**に示す。草丈および被度ともに推定値は過少評価傾向にあるが、平面的な分布傾向についてはおおそ再現できていると考える。夏季に比べ冬季の分布範囲が減少している傾向

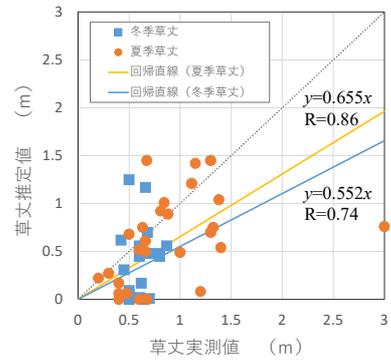


(a) 夏季

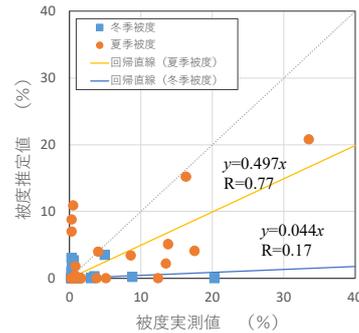


(b) 冬季

図-11 アマモ草丈平面分布の比較

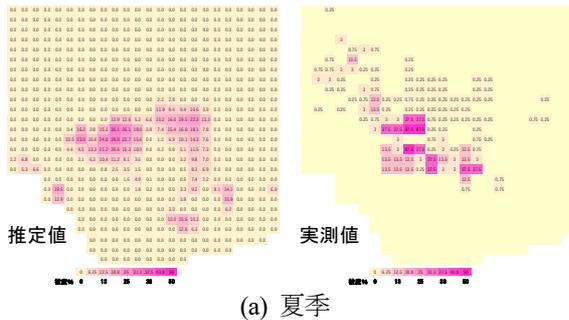


(a) 草丈の推定値と実測値との相関

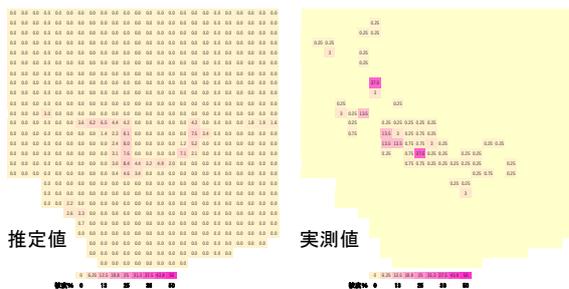


(b) 被度の推定値と実測値との相関

図-13 アマモ被度平面分布の比較



(a) 夏季



(b) 冬季

図-12 アマモ被度平面分布の比較

も表現できている。また、草丈については、分布範囲の再現だけでなく草丈の長短の平面的な傾向についても表現できていることが、本モデルの利点である。なお、草丈に比べ被度の再現性は劣っている。

草丈および被度の推定値と実測値の相関を確認したものを図-13に示す。現地データが限定的であることや現地と数値解析の平面的な一致の限界を考慮して、3メッシュ四方の9個のデータごとにその範囲の平均値で比較している。この結果からも被度に比べ草丈の方が再現性が良く、冬季より夏季の方が良かった。最も再現性が良

かった夏季の草丈では、推定値は実測値より小さい傾向のデータはあるものの、ほぼ同等の値として推定されたデータもあり、相関係数が0.86となった。一方、データの情報が少ない冬季の被度は相関係数0.17であった。

今回の手法による推定結果は現地結果との定量的な再現は十分とは言えないものの、定性的には現地を再現できていると考える。

(3) 各パラメーターの寄与率の評価

ここでは、先の平面分布の算出に使用した各パラメーターの寄与度を表す関数を確認することで、アマモの草丈や被度と物理的環境との関係について考察する。

図-14に物理環境の各パラメーターを横軸にして、夏季および冬季の草丈および被度への寄与を表す折れ線関数(式(2))に重みを考慮して示した。この結果は、限られたデータに基づく当てはめであり、パラメーターの影響を正しく評価できているかについては不確定ではあるが、平面分布がある程度評価できていることを考えると参考にはなると思われる。

被度の再現性は、草丈に比べ劣っていたが各パラメーターの寄与関数の傾向は大きくは変わらない。水深や波高、細粒分割合、シールズ数の寄与関数は明瞭でないものもあるが単一のピークを持ち、各パラメーターともに寄与が大きい範囲は限定的であると見える。また、地形変化については、堆積傾向の場所の方が侵食傾向の場所

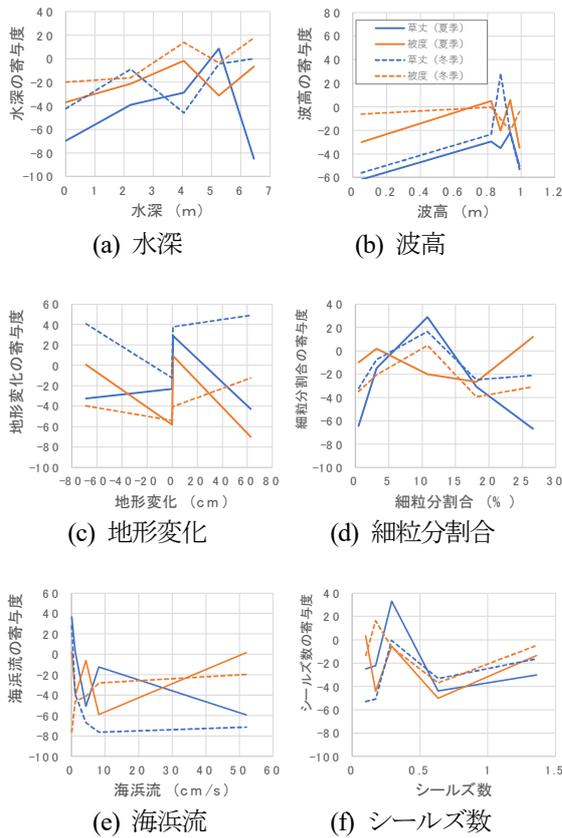


図-14 各物理環境の寄与関数の推定結果

に比べて寄与度が大きい傾向が確認できる。一方で、海浜流については、明瞭なピークは見られず全体的に寄与度は低い傾向にある。

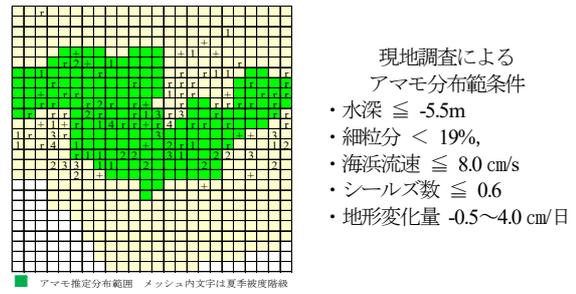
5. まとめ

アマモの草丈や被度を SI モデルに類似した物理環境の折れ線関数の組み合わせで評価できると仮定し、その関数を遺伝的アルゴリズムを用いて推定した。

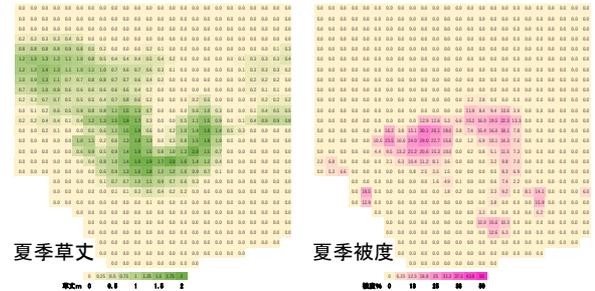
従来のように、各パラメーター別のアマモが分布する範囲を重ねあわせると、図-15 に示すように実測によるアマモ分布範囲を概略的には再現することができる³⁾。しかし、その範囲内での群落密度や草丈を表すことはできない。HSI モデルでは分布の状況を 0~1 の間で基準化するの、群落状況も再現できることになっているが、的確な再現は困難である。

今回用いた遺伝的アルゴリズムを用いる計算方法では各パラメーターの平面分布を実測あるいは計算により明らかにすれば、人為的に SI モデルを作ることなく各パラメーターごとの海草分布の関数を自動算出し、設定できる。また、今回のような限られた情報でも平面分布や各パラメーターの寄与程度について結果が得られたことは、本手法の可能性を示すことができたと言える。

また、実務への適用を考えると、光透過量、塩分等の



(a) 実測パラメーター積み重ねによる分布再現



(b) 遺伝的アルゴリズムを用いた分布再現

図-15 分布推定結果の比較

同一の水質である海域が対象になる。このような場所の、港湾等であれば、波浪や底質などの物理的条件が明らかになっていることも多く、可能な範囲で点的なアマモ分布状況を計測すれば、本手法を用いてその面的な状況を大まかに表すことができる。

対象とする海域ごとに関数を求める必要はあるが、現在アマモ等の海草が分布している小湾や港湾内で、浅場造成などにより海草群落を拡大させる場合の計画に活用できると考えた。

NOTES

注1) 海上保安庁「海洋状況表示システム」(海しる) <https://www.msil.go.jp/msil/htm/topwindow.html>

REFERENCES

- 堀 正和：ブルーカーボンを利用した気候変動の緩和と適応策の実践-海藻草場を利用した増養殖の展開，日本水産工学会誌，56 巻，3 号，pp.197-200，2020. [Masakazu, H. : Implementation of Climate Change Mitigation and Adaptation Measures Using Blue Carbon – Development of Aquaculture Using Macrophyte Vegetation, *Fisheries Engineering*, Vol.56, No.3, pp.197-200, 2020.]
- マリノフォーラム 21：アマモ類の自然再生ガイドライン，pp.3_6-3_12，2007. [Marino Forum 21: *Amamo rui no Shizen Saisei Gaidorain*, pp. 3_6-3_12, 2006.]
- 高山 百合子，小林 昭男，国分 秀樹：英虞湾の干潟・アマモ場再生実験データに基づいた HSI モデルによる干潟生物環境評価，海岸工学論文集，54 巻，pp.1256-1260，2007. [Yuriko, T., Akio, K., and Hideki, K., Assessment for Habitat of Benthos Class by HSI Model based on Field Study of Regeneration of Tidal Flat and Eelgrass Zone

- in Ago Bay, *Proceedings of Coastal Engineering, Japan Society of Civil Engineers*, Vol.54, pp. 1256-1260,2007.]
- 4) 増田龍哉, 鳥居 洋, 飯尾昌和, 矢北孝一, 上久保 祐志, 滝川 清, 八代海野坂の浦における HSI モデルを用いたアマモの生育環境評価, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 71 巻, 2 号, pp. I_921-I_926, 2015. [Tatsuya, M., Hiroshi, T., Masakazu, I., Kouichi, Y., Yuuji, K., and Kiyoshi, T. :Growth Environment Evaluation of Eelgrass by Habitat Suitable Index Model in the Yatsushiro Bay “Nosakanoura”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.B3, Ocean Engineering*, Vol.71, No.2, pp. I_921-I_926,2015.]
- 5) 中瀬 浩太, 田中 裕一, 檜山 博昭 : 海浜変形予測手法を用いたアマモ場成立条件に関する研究, 海岸工学論文集, 39 巻, 1006-1010, 1992. [Nakase, K. Tanaka,U. and Hiyama, H.: Research on conditions for formation of eelgrass beds using beach deformation prediction method, *Proceedings of Coastal Engineering of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 39 (2) 1968, Issue 202, pp. 1006-1010, 1992.]
- 6) 中西 哲, 大場達之, 武田義明, 服部 保 : 日本の植生図鑑 <I>森林, pp.168, 保育社, 1983. [Nakanishi, T., Ooba T.,Takeda, Y. and Hattori,T. : *Nihon no Shokusei zukan< I >Shinrin*, pp. 168, Hoikusha, 1983.]
- 7) 星野 義延 : 種多様性算出のためのBraun-Blanquetの優占度階級値のパーセント被度値への変換方法, 環境科学会誌, Vol.4, No.3, pp.193-205,1991. [Hoshino, Y.: Transformation from the Braun-Blanquet Cover-Abundance Scale to Percentage Cover for the Calculation of Species Diversity, *Environmental Science*, Vol.4, No.3, pp.193-205,1991.]
- 8) 鶴飼亮行, 村上智一, 水谷 晃, 中瀬浩太, 下川信也, 河野裕美 : 西表島網取湾内の物理環境情報を用いたサンゴ被度平面分布推定方法の開発, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71, No.2, I_963-I_968, 2015. [Ukai, A. Murakami, T. Mizutani, A. Nakase, K. Shimokawa, S. and Kohno, H.: Estimation technique of spatial coral distribution in Amitori bay, Iriomote island, Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*. 2015, Vol.71, No.2, p.I_963.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

REPRODUCTION OF EELGRASS DISTRIBUTION BASED ON PHYSICAL CONDITIONS USING GENETIC ALGORITHM

Kota NAKASE and Akiyuki UKAI

Suitable sites for eelgrass can be evaluated from the range of parameters such as depth and Shields number. Using existing data where the eelgrass distribution and physical conditions in the same mesh, line graphs for each parameter for coverage and leaf length, and regarded HSI number string as a set of genetic information. Although the coverage and leaf length distribution could be reproduced qualitatively by 100,000 trials, there were many eelgrasses non-distribution areas, and quantitative problems were observed in the coverage and leaf length.