

[特 集]

アマモ場分布限界水深の予測評価手法

森田健二¹・竹下 彰²¹正会員 株式会社 東京久栄 環境創造エンジニアリング部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋三丁目1-15)

E-mail: morita@tc.kyuei.co.jp

²工修 株式会社 東京久栄 環境水理部 (〒333-0866 埼玉県川口市芝鶴ヶ丸6906-10)

アマモ場の分布限界水深を上限が波浪による葉条の切断もしくは株の流失現象、下限が純光合成光量低下による枯死現象に起因するものとして捉え、天然のアマモ群落の形成状況を基準にそれらの予測評価手法を開発し、適用性を検討した。その結果、砂質地盤に形成されるアマモ場の分布上限は、シーلز数が0.2以下、底層流速が0.6m/s以下の水深帯にあることが判明した。また、アマモ場の分布下限水深は、水中光量から補償点光量を差引いた純光合成光量の月別平均値が0となる水深で概ね表現できることが示された。純光合成光量の月別平均値は、海域ごとのアマモの季節的消長や光条件悪化の原因となる環境要因を解明し、アマモ場の保全・環境改善対策検討のツールとなり得ることが示された。

Key Words : eelgrass, critical depth, limiting factor, estimation method

1. 背景と目的

アマモ (学名 *Zostera marina*, 英名 eelgrass) は陸上のイネやニラに良く似た海草で、北半球の温帯域から亜寒帯域を中心に広く分布している。アマモは静穏な砂泥質の浅海底に地下茎と根を張って生育し、竹のように地下茎の伸張と分枝によって群落を維持している。春には花穂を形成して米粒ほどの大きさの種を実らせ、その分散によって分布域を拡大している。アマモがまとまって生えている場所はアマモ場と呼ばれ、沿岸域の多種多様な生物の産卵、保育、餌場となっている。このため、水産面では古くから漁場として活用されてきたが、近年では生長に伴う栄養塩・炭素吸収、溶存酸素供給といった環境保全機能も注目されている。さらに、アマモ場の干潟・アシ原と連続した生態系のユニットとしての位置付けや環境学習の場としての認識も高まりつつあり、市民団体等が回復活動を行なっている地域もある。

国内では環境や自然と共生した各種沿岸域整備事業の推進が謳われ、マニュアルの発行¹⁾²⁾とともに法制度の整備も進められている。欧米では既に環境指標としての海草場の位置付けが確立されており、保全・回復のためのガイドラインも発行されている³⁾⁴⁾。

アマモの生育条件に関する調査研究も国内外で数多く実施されてきており、それらを統合してアマモの生育に関連する環境条件と判断基準が川崎ら (1988)⁵⁾、

(財) 海洋生物環境研究所 (1991)⁶⁾、(財) 日本水産資源保護協会 (1992)⁷⁾ そして (社) 日本水産学会 (1996)⁸⁾ 等によって示されている。その結果、還元論的に個別の環境要因についての限界値が整理され、例えばアマモ場の鉛直分布上限水深の基準値として干出ししない方が望ましい、塩分は17~34psuの範囲が適当、年間の最小透明度は1.0m以上といったように広域的に適用可能な必要条件が示された。しかし、アマモ場の分布上限水深が同一海域にあっても海象条件と海岸線の向きで異なること、透明度が相対的に高い海域・時期でもアマモの生長速度が低下したり枯死したりする場合があることなど、個別の環境要因だけでは海域ごとの実態を十分に説明できない場合もある。

そこで、(財) 電力中央研究所の研究グループはアマモの生育限界支配要因を、岸側では波・流れによる砂地盤の安定度、沖側では海底に到達する光の量と考え、丸山ら⁹⁾は岸側の砂地盤の安定度を左右する掃流力の限界値を現地調査並びに水理実験からシーلز数 Ψ が0.08以下とし、石川ら¹⁰⁾は沖側の水中光量の限界値を地方別の全天日射量と海水中の透過率から年平均値で $3E\text{ m}^2\text{ day}^{-1}$ 以上とした。

その後、岸側の砂地盤の安定度を示す限界シーلز数について再検討が行われ、森口ら¹¹⁾は $\Psi < 0.27$ を、中瀬ら¹²⁾¹³⁾、島谷ら¹⁴⁾は個別の海域のアマモ場の分布状況と波浪・流況観測並びに算定結果から、常時においては

0.1 < Ψ < 0.3, 高波浪時では Ψ < 0.5 の値を算出し, 丸山らとは異なる結果を示した。

また, 沖側の水中光量については, 光量低下に伴う枯死現象が1ヶ月程度の短期間でも起こりえること, さらに一般に水中植物の生育下限水深に対応する補償点光量は水温変動に伴う呼吸量についても算定する必要があることから, 水中光量の年平均値のみでは分布下限水深を的確に表現できない。

そこで, 筆者らはより広域的な観点から検討することで限界値の予測評価精度を高められると考え, 全国に分布する代表的な天然のアマモ群落の形成状況を基準に, アマモ場の分布上限水深を規定すると考えられるシールズ数と分布下限水深を規定すると考えられる純光合成光量(水中光量-補償点光量)の予測評価手法を開発し, その適用性を検討した。

2. アマモ場分布上限水深と波浪環境

(1) 検討内容

(社)マリノフォーラム 21 浅海域緑化技術の開発グループは, 環境庁発行の第4回自然環境保全基礎調査¹⁵⁾を基に, 全国に分布する主要なアマモ場から地域性などを考慮して合計 64 地点を抽出し, 波浪環境を主とした諸元を整理・解析した¹⁶⁾。整理・解析項目は表-1 に示すとおりである。

また, 現存するアマモ場分布と地形, 気象, 海象の代表値を整理することにより全国をほぼ網羅するアマモ場と物理環境のデータベースが作成され, 大まかな物理環境条件が把握された。この結果により, 全体の約 75% のアマモ場が, 年最大波相当の波高が 1m 以下の海域にあることが判明したが, この波高はあくまで対象海域の沖波波高であり, 地形や水深の影響を受けたアマモ場の波高分布と対応したものではない。

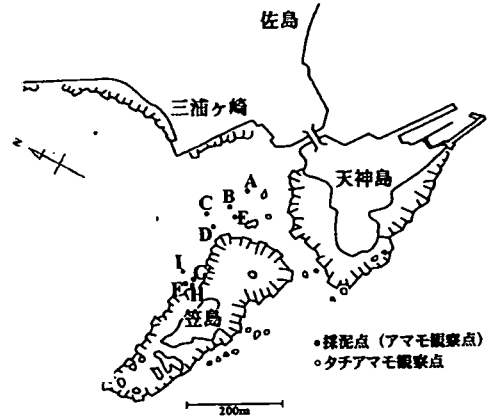
そこで筆者らは, この全国 64 地点の中から海域特性やデータの整備状況を考慮し, モデル海域として①神奈川県三浦ヶ崎, ②香川県高見島, ③岡山県千軒湾の3海域を抽出した。これら3海域で現地調査や波浪変形シミュレーションを実施して現地のアマモ場分布状況と比較

する事により, 更に詳細なアマモの生育に係わる物理環境要因やそれらの限界値について検討した。

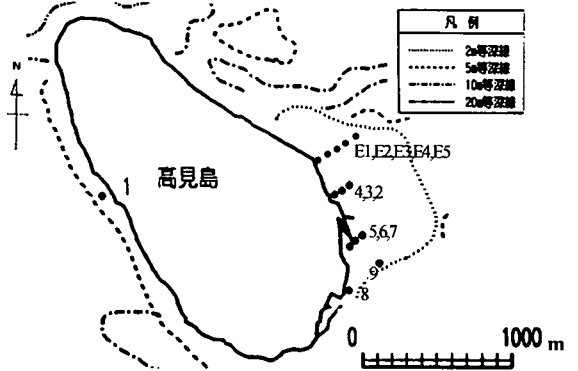
図-1 にモデル海域のアマモ観測点を示す。

アマモ場分布の上限水深の制限は, 高波浪時の底層流速の増大によるアマモ葉条部の切断と底質の移動・洗掘に伴う株の流失と考えられるため, 波浪による底層流

①神奈川県三浦ヶ崎



②香川県高見島



③岡山県千軒湾

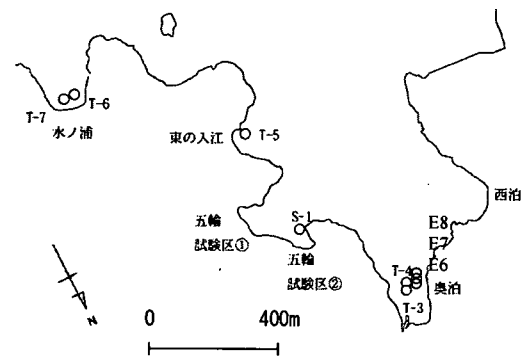


図-1 モデル海域のアマモ観測点

表-1 諸元の整理・解析項目¹⁶⁾

項目	整理・解析の目的	使用資料
波高・周期	対象地点の波浪状況把握	波浪推算
地形	開口部の方向, 閉鎖度など	海図
海底勾配	海底勾配の算定	海図
底質	砂礫, 泥・シルトの割合	調査データ, 海図

と底質の移動限界を把握する事が重要となる。そこでまず、アマモの生育限界を考える場合の沖波条件の設定について検討し、エネルギー平衡方程式モデルによる波浪変形シミュレーションを実施した。

次に、丸山ら⁹⁾と同様に波高、周期の予測結果と微小振幅波理論から底層流速 u_b を式(1a)により求め、底質条件と合わせて底質の安定性を示す指標であるシルズ数 Ψ を式(1b)により算定した。これらの物理環境指標と現地のアマモ場分布(平成11年12月、目視観察)を比較する事によって、アマモ場分布の上限水深を適切に判定できる物理環境指標について検討した。なお、波の条件としては有義波の値を用いた。これはアマモ葉条の切断や株の流失が、大きな波一歩よりも何波か連続して作用したときに発生すると考えられるからである。

$$u_b = \pi H / T \sinh kh \quad (1a)$$

$$\Psi = u_*^2 / (\rho_s / \rho - 1) g D \quad (1b)$$

$$u_* = \sqrt{0.5 f_w u_b^2} \quad (1c)$$

ここに、 π :円周率、 H :波高、 T :周期、 h :水深、 k :波数、 u_* :摩擦速度、 ρ_s ・ ρ :砂と流体の密度、 g :重力加速度、 D :底質の中央粒径、 f_w :Jonssonの摩擦係数、 u_b :底層流速を示す。

アマモの生育限界を考える場合の沖波条件は、やや高波浪時の波として年最大波程度の有義波を用いる事とした(表-2)。具体的には、アメダスの風資料を用いて風向別の年最大風に対応する波浪をSMB法を用いて推算し、5年間の平均値を用いた。

次に、この波浪推算値を入射波沖波条件として、エネルギー平衡方程式モデルによる波浪変形シミュレーションを実施した。

予測に用いた式は(2)に示すとおりである。

$$\frac{\partial(D_s V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(D_s V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(D_s V_\theta)}{\partial \theta} = -\varepsilon'_b S \quad (2)$$

$$D_s = S \delta f \delta \theta$$

$$V_x = C_g \cos \theta, V_y = C_g \sin \theta$$

$$V_\theta = \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right)$$

ここで、 S :波浪スペクトル、 δf :周波数分割幅、 $\delta \theta$:方向分割幅、 C_g :波の群速度、 C :波速、 θ :波向、 ε'_b :碎波によるエネルギー逸散率である。

(2) 結果と考察

波高、底層流速、シルズ数とアマモの生育状況との適合度を表-3に示す。表中でアマモの生育状況が

‘×’になっている地点は各物理指標の値が他地点と比較して大きく、物理環境条件が厳しい事が判る。

表-2 沖波条件

モデル海域	波高	周期	波向
三浦ヶ崎	1.3m	4.4s	SSW
高見島	0.8m	2.8s	SE
千軒湾	1.3m	4.0s	S

表-3 モデル海域の物理環境指標とアマモ生育の適合度

海域	測点	波高 (m)	底層流速 (m/s)	シルズ数	アマモ生育状況
三浦ヶ崎	A	0.25	0.29	0.045	○
	B	0.46	0.50	0.100	△
	C	0.46	0.41	0.120	△
	D	0.44	0.50	0.141	△
	E	0.53	0.55	0.131	△
	F	0.20	0.13	0.012	○
	G	0.30	0.23	0.032	○
	H	0.21	0.18	0.018	○
	I	0.25	0.25	0.035	○
高見島	2	0.57	0.52	0.178	△
	3	0.50	0.52	0.175	△
	4	0.43	0.59	0.219	△
	5	0.43	0.34	0.087	○
	6	0.50	0.40	0.113	○
	7	0.55	0.29	0.063	○
	8	0.62	0.29	0.067	○
	9	0.72	0.32	0.080	○
	E1	0.50	0.64	0.257	×
	E2	0.55	0.71	0.304	×
E3	0.60	0.77	0.353	×	
E4	0.65	0.84	0.405	×	
E5	0.70	0.90	0.461	×	
千軒湾	T3	0.42	0.61	0.131	△
	T4	0.47	0.54	0.048	○
	T5	0.30	0.15	0.047	○
	T6	0.77	0.83	0.353	×
	T7	0.67	0.92	0.475	×
	S1	0.27	0.30	-	▽
	E6	0.55	0.81	0.213	×
	E7	0.60	0.88	0.247	×
E8	0.65	0.96	0.283	×	

※シルズ数の‘-’は、粒径が細かすぎるため算定の適用範囲(0.0074mm以上)外。

※アマモの生育状況(○:群落形成、△:パッチ状分布、×:分布せず、▽:現時点では生育しているが減少傾向にあり今後の経過観察が必要)。

波高分布の計算事例を図-2 に、底層流速、シールズ数とアマモの生育状況の関係を図-3 に示す。ここでシールズ数に着目すると、その値が 0.1 を超えるとアマモの分布状態がパッチ状となり、さらに 0.2 を超えるとアマモの生育はほとんど認められなくなる。一般的に、アマモの分布状況は波流れなどの物理環境が厳しくなるにつれて株密度がまばらになりパッチ状の分布を示すことから、この付近にシールズ数の限界値があると考えられる。

丸山ら⁹⁾のシールズ数の限界値(0.08)より、森口ら¹⁰⁾が示した限界値(0.27 以下)に近い結果であった。底層流速の限界値は、0.6m/s 程度と考えられる。

(3) 結論

1) 波による底層流速のみではアマモの支持基盤としての

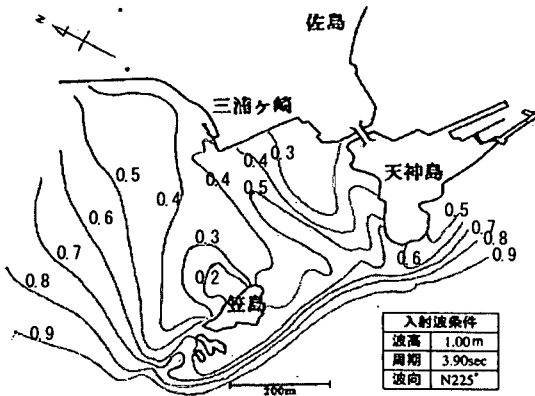


図-2 波高分布計算事例(神奈川県三浦ヶ崎) 単位: m

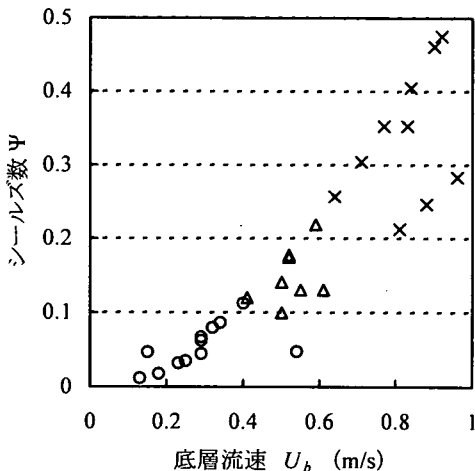


図-3 アマモ場分布上限水深付近の底層流速、シールズ数とアマモの生育状況の関係 (○: 群落形成, △: パッチ状分布, ×: 分布せず)

底質条件が考慮されないため、波浪条件と底質条件の両方が考慮されたシールズ数が評価指標として有効であり、調査結果から砂質地盤におけるその値は概ね '0.2 以下' と考えられる。

2) 今回の調査では、底層流速はアマモ場分布の限界値として概ね '0.6m/s' 以下であった。

3) シルト・粘土分を主体とした軟弱な底質の地点にはシールズ数を適用できないため、地盤の支持強度やアマモ根茎の固着力など、他の評価指標の開発が必要である。

3. アマモ場分布下限水深と光環境

(1) 検討内容

アマモの生長は、基本的に光合成に有効な波長範囲の日照量、海面での反射率、海中での透過率、水深、水温の変動によって増減する光合成速度に対して水温変動によって増減する呼吸速度の収支によって規定されている。しかし、従来のアマモ場分布下限水深に対する光環境の評価は、水中光量の年間平均値もしくは季節別の必要光量で評価し¹⁰⁾、呼吸による消費を考慮してこなかったため、必ずしも実態を反映した結果とはなっていない。そこで、水中における光合成に有効な光強度の時間積分値を水中光量、呼吸速度に見合う光強度の時間積分値を補償点光量とし、その収支を純光合成光量とすることで分布下限水深との関係を検討した。その関係は式(3a)のように表せる。

$$I_n = I_z - I_c \quad (3a)$$

ここで、 I_n は純光合成光量 ($E\ m^2\ day^{-1}$)、 I_z は水深 Z (m) における水中光量 ($E\ m^2\ day^{-1}$)、 I_c は補償点光量 ($E\ m^2\ day^{-1}$) である。

また、水深 Z (m) における水中光量 I_z ($E\ m^2\ day^{-1}$) は式(3b)によって表せる。

$$I_z = I_0 \exp[-KZ] \quad (3b)$$

ここで、 K (m^{-1}) は水中光量の鉛直透過率から求めた消散係数である。また、水面直下の水中光量 I_0 ($E\ m^2\ day^{-1}$) は式(3c)によって求められる¹⁰⁾。

$$I_0 = S_r \times 0.42 \times 0.79 \times 0.2 \div 0.0428 \quad (3c)$$

ここで、 S_r は全日日照量 ($MJ\ m^2\ day^{-1}$) の日積算量の月別平均値¹⁷⁾、0.42は全日日照量に占める光合成に有効な波長 (PAR) の割合、0.79は海面での反射減衰率

(水面直下の光量/水面上の光量), 0.2はcalとE(Einsteinは1アボガドロ数の光子の持つエネルギー量)の換算係数 ($1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1} = 0.20 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), $1/0.0428$ はMJとcalの換算係数 ($1 \text{ MJ m}^{-2} = 1/0.0428 \text{ cal cm}^{-2}$) である。

本論文では神奈川県横須賀市の小田和湾, 山口県柳井市の柳井湾および東京湾内の2地点(船橋, 木更津)について光環境の検討を行なった。検討を行なった4地点

国土地理院地図 予12000 第207号



図-4 アマモ場の分布下限水深と純光合成光量の関係を検討した4地点(船橋, 木更津, 小田和湾, 柳井湾)の位置図。

この地図は国土地理院の承認を得た「白地図 MapMap」の地図画像を編集したものである。

の位置を図-4に示す。光環境の検討を行なう上で必要となる消散係数と水温のデータは, 小田和湾と柳井湾の2地点については石川ら¹⁹⁾の報告に記載されている実測データを用いた。一方, 東京湾内の2地点についてはアマモ場内のデータが無いので, 近傍の公共用水域水質測定データ(1989.4から1999.3までの月平均値, 船橋:1260501, 木更津:1260401)¹⁹⁾を用いた。

なお, 公共用水域水質測定データには消散係数は含まれていないため, Persons et al.¹⁸⁾にしたがい, 透明度から式(3d)により換算した。

$$K = 1.7Tr^{-1} \quad (3d)$$

ここで, Tr は透明度 (m) である。

さて, 我が国の九州・四国南岸は, 夏期表層海水温の平均値が28°C程度であり, 多年生アマモ群落の分布南限に当たっている²⁰⁾。さらに夏期の表層海水温が30°Cを超えるような閉鎖性の強い海域では全ての個体が一旦枯死し, 実生の加入によって群落を維持する一年生のアマモ場が形成されている²¹⁾。

したがって, 水温の変動によって大きく左右されるアマモの補償点光量算定には30°C以上の測定値を含んでいないと正しい評価が行なえない。しかし, アマモの補償点光量の測定例にはDennison et al.²²⁾, Zimmerman et al.²⁴⁾ などによる報告があるが, 30°C以上の高温まで測定した例は少ない。そこで, 筆者らは水温30°C以上の測定値を含んでいるMarsh et al.²³⁾の測定データから最小二乗法で求めた式(3e)により補償点光量 I_c を算出した(図-5参照)。

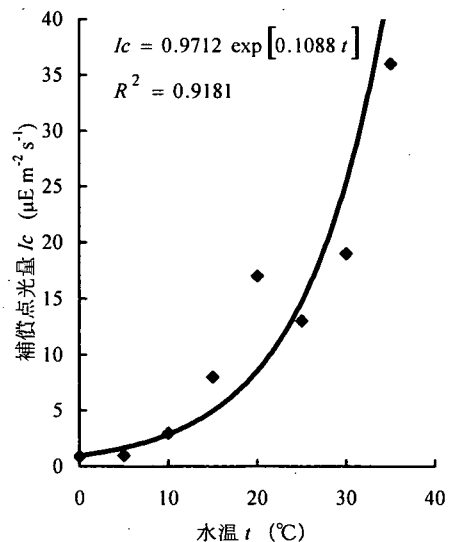


図-5 水温 t とアマモの補償点光量 I_c の関係

$$I_c = 0.9712 \exp [0.1088 t] \quad (3e)$$

ここで、 t は水温(°C)である。

(2) 結果と考察

a) 小田和湾及び柳井湾の結果

アマモ場の分布下限水深と純光合成光量の関係を検討するため、小田和湾と柳井湾の全天日射量、光子消費係数、潮位関係、水温別の補償点光量のデータから月別の純光合成光量 I_n を求めた結果を図-6に示す。

アマモの株密度は、周年生育がみられる群落内ではほぼ連続して均一な状態にあり、水深が深くなるに連れて徐々に低下していく。さらに群落形成の下限水深より深くなると、一時的にアマモが生育するが、その密度は実生の加入によって決まるため、まばらな点生状態になる。図中には水面直下の水中光量 I_0 とともにアマモの株密度が均一で連続している群落内とその下限、群落下限より深い点生域の水深帯における純光合成光量 I_n の経月変化を示している。

水面直下の水中光量 I_0 は、絶対値や細部形状がやや

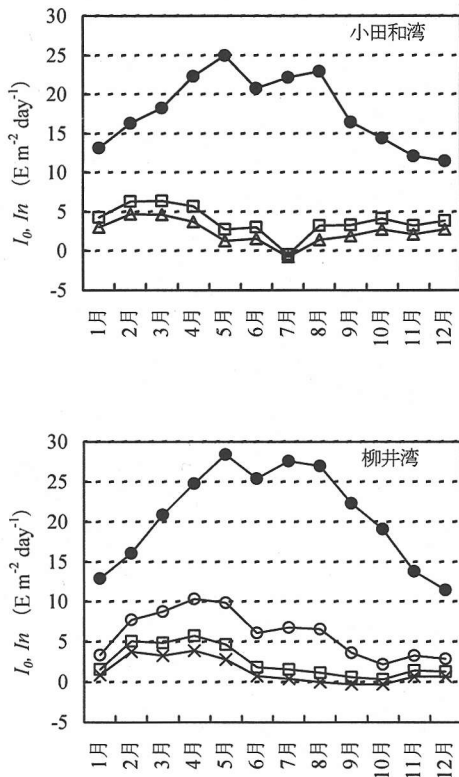


図-6 水面直下の水中光量 I_0 (●) とアマモの純光合成光量 I_n (○: 群落内, □: 群落下限, △: 点生域, ×: 群落外) の経月変化

異なるものの、小田和湾、柳井湾ともに例年1月から上昇をはじめ、5月と7月、8月にピークを示した後徐々に減少していく。それに対して、小田和湾湾口部におけるアマモの純光合成光量 I_n は1月から3月にかけて緩やかに上昇した後5月にかけて一旦減少し、7月にさらに大きく落ち込む。8月には急速に回復するが、その後は12月まで横ばい状態が続く。この結果によると、小田和湾においては7月の純光合成光量低下が群落形成の下限水深を決定付けているものと考えられる。

一方、柳井湾におけるアマモの純光合成光量は1月から上昇して4月、5月にピークを示した後6月に大きく落ち込む。その後は横ばい状態から徐々に減少をはじめて10月に最低となり、11月以降にやや回復する。アマモ群落内の純光合成光量は、当然のことながら年間をとして高い値を示すが、群落の下限付近の水深帯では9月から10月にかけて低い値が続いている。アマモ場の点生域よりさらに深い群落外では、この期間に純光合成光量がマイナスの値となっており、この時期の光環境条件が群落形成の下限水深を決定付けているものと考えられる。

以上のような純光合成光量の変動は、川崎ら⁹⁾と川端ら²⁰⁾が報告している現地のアマモの季節的消長とも概ね一致している。

b) 東京湾の結果

東京湾の最奥部に位置する船橋海域の近傍には、千葉県北部で唯一埋め立てによる消失を免れた干潟・浅海域である三番瀬が広がっている。千葉県北部の埋立事業が大きく進展する以前の昭和30年代まで、東京湾奥部にはこの三番瀬をはじめ、広大な砂質干潟が連続してあり、その地先の浅海域にはコアモ、アマモを主体とするアマモ場が広く分布していた²⁷⁾。

しかし現在では、大潮の干潮線付近に春先から小規模なアマモのパッチ状群落を確認されるのみで、例年8月以降になるとアマモは枯死・流失してしまう。筆者らが2001年7月に三番瀬で確認した小規模なアマモのパッチ状群落(写真-1)も8月以降は確認できなかった。

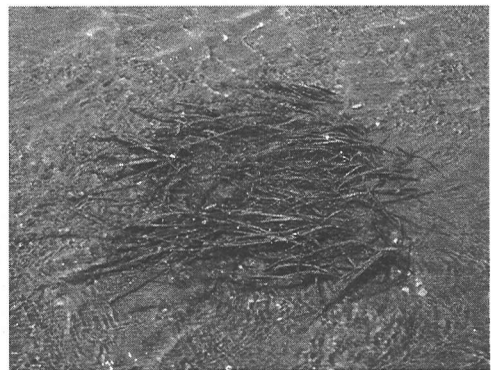


写真-1 三番瀬の干潮線付近で確認したアマモのパッチ状群落 (2001.7.22撮影)

一方、木更津近傍の小櫃川河口に広がる盤洲干潟は後背地にアシ原が広がり、東京湾の原風景をとどめた場所として知られている。その地先の浅海域にはアマモを主体とするアマモ場が安定的に形成されており、近年減少傾向にあるものの、東京湾の東海岸でアマモの周年生育が認められる地点としては最奥にある。

このような東京湾におけるアマモ場の分布下限水深と純光合成光量の関係を検討するため、船橋と木更津の全天日射量、光量子消散係数、潮位関係、水温別の補償点光量のデータから月別の純光合成光量 I_n を求めた結果を図-7に示す。

船橋と木更津における水面直下の水中光量 I_0 は、2地点とも小田和湾と同様に東京気象台のデータを用いているため同一であるが、純光合成光量 I_n の経月変化特性は大きく異なっている。

まず、船橋海域におけるアマモの純光合成光量 I_n の計算結果を見ると、3月から4月にピークを示した後は8月にかけて直線的に落ち込んでおり、しかも8月の時点ではCDL-0.5mという浅海域においても純光合成光量はマイナスとなっている。したがって、現状の水温と水質条件下でアマモが栄養株の状態を越冬することは困難と考えられ、筆者らの現地観察結果とも一致する。しか

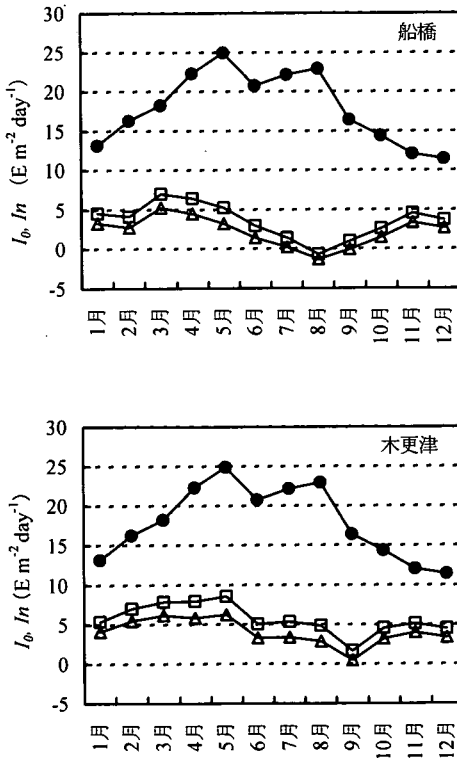


図-7 水面直下の水中光量 I_0 (●) と水深別アマモ純光合成光量 I_n (□: CDL-0.5m, △: CDL-1.0m) の経月変化

し、浅海域に限ってみると、8月を除けばアマモの純光合成光量はプラス側にあることから、種子の供給さえ順調に行われれば一年生のアマモ場形成は十分に可能と考えられる。先のアマモのパッチ状群落形成もそのことを裏付けている。

次に、木更津におけるアマモの純光合成光量 I_n の計算結果を見ると、1月から5月にかけて緩やかに上昇した後、6月に大きく落ち込む。その後8月までは横ばい状態が続くが、9月になるとさらに一段大きく落ち込み年間で最低となる。水深帯別にみると、CDL -1.0m付近でこの時期に0近くなることから、この海域ではこれより浅い地点でアマモ場が形成されているものと考えられる。

c) 考察

地点間でなぜこのようなアマモの純光合成光量の違いが生じるのか、どのような要因によってアマモ場の分布下限水深が決定付けられているのか、どのような保全・改善対策が有効となりうるのかという点について、同じ東京湾内に位置する船橋と木更津を対象に若干の検討を行った。

アマモは 30°C を超える高水温や透明度低下による純光合成光量低下の下では急速に枯死してしまう。透明度低下の要因として、東京湾のような富栄養化が進んだ海域では、一般に植物プランクトンの増殖が考えられる。植物プランクトンの増殖は水質中の COD 値上昇として捉えられる。そこで、1989年から1998年までの毎月の公共用水域水質測定データから、それぞれの海域で純光合成光量 I_n が最低となる月(船橋は8月、木更津は9月)における COD (mg/l) と透明度(m) の関係を図-8に示す。

船橋海域における純光合成光量の計算結果からは、年によっては 30°C を超えるような8月の高水温と透明度

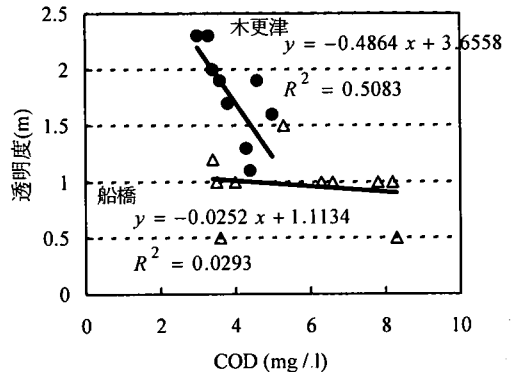


図-8 船橋(8月)と木更津(9月)海域におけるCODと透明度の関係(△: 船橋8月のデータ, ●: 木更津9月のデータ)

低下がアマモの周年生育を困難にしていることが示されている。そこで、CODと透明度の関係をみると、当該海域における両者の相関は極めて低く ($R^2=0.0293$)、この時期の透明度低下が植物プランクトンのような有機懸濁態物質ではなく、土砂などの無機懸濁態物質に起因していることが示唆されるが、その要因は不明である。

一方、木更津海域では過去10年間の最高水温も28℃以下に留まっていることから、主として9月における透明度低下がアマモ場の分布下限水深決定に大きく関わっていると考えられる。

この時期の当該海域におけるCODと透明度の相関は比較的高く ($R^2=0.5083$)、同様に水質の全リン濃度とも良い相関がみられている。このことから、当該海域においては、リン濃度が律速する植物プランクトンの増殖が透明度低下の支配要因と考えられる。河口干潟に位置する立地特性を考慮すると、陸域からのリンを主体とする栄養塩負荷削減がアマモ場の保全・改善対策として有効に機能する可能性がある。

以上のように、既存の資料を用いてアマモの純光合成光量を算定し、天然のアマモ群落の形成状況と対比した結果、アマモ場の分布下限水深は水深別の水中光量 I_z から補償点光量 I_c を差引いた純光合成光量 I_n の月別平均値で概ね表現できることが示された。また、純光合成光量 I_n の月別平均値は、海域ごとのアマモの季節的消長や光合成環境悪化の原因となる環境要因を解明し、保全・改善対策を検討するためのツールともなり得ることが示された。

ただし、海域によっては求めようとする環境データが既存資料だけでは時空間スケールや精度の点で必ずしも埋めきれないケースが十分に考えられる。特に補償点光量算定のためには対象海域の消散係数と水温別の光合成速度を正確に把握する必要がある。

例えば、今回の検討では透明度から消散係数を換算する係数を固定して検討を行なったが、季節や海域によって水中光の波長特性が異なれば換算係数も変化させる必要があり、より正確な評価を行なうためには対象海域で実測頻度を上げる必要がある。また、光合成速度の測定は、通常は測定装置が小型のため葉片のみで測定を行なっているが、根茎部の代謝を含めた個体全体での測定を行なわないと実態を詳細に把握できない。

さらに、測定上の問題としてアマモの生理的限界に近い低水温・高水温下では安定した測定値を得にくいといった課題も指摘されており、モニタリング体制の充実とともに機器の開発を含めた測定精度の向上が望まれる。

(3) 結論

1) 既存の資料を用いてアマモの純光合成光量を算定し、

天然のアマモ群落の形成状況と対比した結果、アマモ場の分布下限水深は水深別の水中光量 I_z から補償点光量 I_c を差引いた純光合成光量 I_n の月別平均値で概ね表現できることが示された。

2) 純光合成光量 I_n の月別平均値は、海域ごとのアマモの季節的消長や光合成環境悪化の原因となる環境要因を解明し、保全・改善対策を検討するためのツールともなり得ることが示された。

4. まとめ

アマモ場の分布限界水深を上限が波浪による葉条の切断もしくは株の流失現象、下限が純光合成光量低下による枯死現象に起因するものとして捉え、天然のアマモ群落の形成状況を基準としてそれらの予測評価手法を開発し、適用性を検討した。その結果と特徴を以下にまとめる。

1) アマモ場の分布上限水深と波浪環境の関係を検討するため、神奈川県横須賀市の小田和湾、岡山県日生町の千軒湾そして香川県高見島の3地点について詳細に検討した結果、底質が砂質の場合、アマモ場はシールズ数 Ψ が概ね0.2以下の水深帯に形成されていることが判明した。また、今回の調査結果では底層流速の限界値が概ね0.6m/s以下であった。

2) シルト・粘土分を主体とした軟弱な底質の地点にはシールズ数を適用できないため、地盤の支持強度やアマモ根茎の固着力など、他の評価指標の開発が必要である。

3) アマモ場の分布下限水深と光環境の関係を検討するため、神奈川県横須賀市小田和湾、山口県柳井市柳井湾そして東京湾奥部でアマモの分布が確認されている船橋(三番瀬)と木更津(盤洲)の計4地点について既存資料を基に検討した結果、アマモ場の分布下限水深は水深別の水中光量 I_z から補償点光量 I_c を差引いた純光合成光量 I_n の月別平均値が0となる水深で概ね表現できることが示された。

4) 純光合成光量 I_n の月別平均値は、海域ごとのアマモの季節的消長や光合成環境悪化の原因となる環境要因を解明し、保全・改善対策を検討するためのツールともなり得ることが示された。

5) 純光合成光量 I_n 算定の基礎となる既存の資料は、求めようとする海域の環境条件と次空間スケールや精度の点で必ずしも合致していない。特に補償点光量 I_c 算定の基礎となる光合成速度の測定には種々の課題が指摘されており、機器の開発を含めた精度の向上が望まれる。

謝辞：本報告の成果の一部は、社団法人マリノフォーラム21 海洋環境保全研究会 浅海域緑化技術の開発グループによる調査研究成果を利用させていただきました。調査研究の過程で数々の有益なご指導・ご助言を頂いた研究会会長の中村 充福井県立大学名誉教授ならびに水産大学校 三本菅 善昭理事長、専門家の奥田 節夫京都大学名誉教授ならびに瀬戸内海区水産研究所 寺脇 利信室長、アドバイザーの財団法人電力中央研究所 川崎 保夫次長の諸先生、そして現地調査・試験と資料解析にあられた岡山県水産試験場と会員企業の皆様にこの紙面を借りて厚く御礼申し上げます。

また、本報告作成にあたりご指導、ご高閲をいただきました株式会社東京久栄 上席理事 鈴木康正博士に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) エコポート (海域) 技術WG編：港湾構造物と海藻草類の共生マニュアル、(財) 港湾空間高度化センター、98p, 1998.
- 2) 自然調和型漁港研究会編：自然調和型漁港づくり技術マニュアル (藻場機能の付加)、(社) 水産土木建設技術センター、225p, 1999.
- 3) Fonseca, M. S., Kenworthy, W. J. and Thayer, G. W.: *Guidelines for the conservation and restoration of seagrass in the United States and adjacent waters*, U.S. Department of Commerce NOAA, 222p, 1998.
- 4) Short, F. T. and Coles, R. G.: *Global seagrass research method*, Elsevier, 473p, 2001.
- 5) 川崎保夫, 飯塚貞二, 後藤 弘, 寺脇利信, 渡辺康憲, 菊池弘太郎: アマモ場造成法に関する研究, 電力中央研究所報告, 総合報告U14, 231p, 1988.
- 6) (財) 海洋生物環境研究所: 藻場の構造と機能に関する既往知見, 95p, 1991.
- 7) (財) 日本水産資源保護協会: 環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための「判断基準」と「事例」, 95p, 1992.
- 8) (社) 日本水産学会: 水産学シリーズ [110] 生物機能による環境修復—水産におけるBioremediationは可能か—, pp. 79-93, 1996.
- 9) 丸山康樹, 五十嵐由雄, 石川雄介, 川崎保夫: 電源立地地点の藻場造成技術の開発第8報, アマモ場造成適地の砂地盤安定度の推定手法, 電力中央研究所報告U87069, 24p, 1988.
- 10) 石川雄介, 川崎保夫, 本多正樹, 丸山康樹, 五十嵐由雄: 電源立地地点の藻場造成技術の開発第9報 水中の光条件に基づくアマモ場造成限界深度の推定手法, 電力中央研究所報告U88010, 20p, 1986.
- 11) 森口朗彦, 高木儀昌, 仲宗根琢磨, 吉川浩二, 團 明紀, 和泉安洋: 分布特性の異なる2つのアマモ場における物理環境現地観測, 水産工学研究所技報, 21, 11p, 1999.
- 12) 中瀬浩太, 田中裕一, 桧山博昭: 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, 第39巻, pp. 1006-10010, 1992.
- 13) 中瀬浩太, 田中裕一: 海浜変形予測手法によるアマモ場成立条件の現地への適用, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1061-1065, 1993.
- 14) 島谷 学, 中瀬浩太, 岩本裕之, 中山哲蔵, 月館真理雄, 星野高士, 内山雄介, 瀧岡和夫: 興津海岸におけるアマモ分布条件について, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1161-1165, 2002.
- 15) 環境庁: 日本の干潟, 藻場, サンゴ礁の現況, 第2巻 (藻場), 400p, 1997.
- 16) 浅海域緑化技術の開発グループ編: 平成11年度 浅海域緑化技術の開発に関する報告書 (要約), (社)マリノフォーラム 21, 30p, 2000.
- 17) 文部科学省 国立天文台編: 理科年表, 丸善, 2002.
- 18) Persons, T. R., Takahashi, M. and Hargrave, B.: 生物海洋学2 粒状物質の一次生成, 高橋 正征, 古谷 研, 石丸 隆監訳, 東海大学出版会, 90p, 1984.
- 19) (財)環境情報普及センター: 全国公共用水域水質測定データファイル [昭和46年度~平成10年度], 2000.
- 20) 野沢恰治: 我が国における海草の分布, 植物と自然, 15 (13), pp. 15-19, 1981.
- 21) 浅海域緑化技術の開発グループ編: 平成13年度 浅海域緑化技術の開発に関する報告書, (社)マリノフォーラム 21, 116p, 2002.
- 22) Dennison, W. C. and Alberte R. S.: Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass), *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol.25, pp. 51-61, 1985.
- 23) Dennison, W. C.: Effect of light on seagrass photosynthesis, Growth and depth distribution, *Aquatic Botany*, 27, pp. 15-26, 1987.
- 24) Zimmerman, R. C., Reguzzoni, J. L., Echeverria, S. W., Josselyn, M. and Alberte, R. S.: Assessment of environmental suitability for growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) in San Francisco Bay, *Aquatic Botany*, 39, pp. 353-366, 1991.
- 25) Marsh, J. A. Jr., Dennison, W. C. and Alberte, R. S.: Effects of temperature on photosynthesis and respiration in eelgrass (*Zostera marina* L.), *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* Vol. 101, pp. 257-267, 1986.
- 26) 川端豊喜, 茅田弘荘, 乾 政秀, 平山和次: 柳井湾における春期から夏期のアマモ *Zostera marina* の生長様式, 日本水産学会誌, 59(3), pp. 445-453, 1993.
- 27) 東京都内湾漁業興亡史刊行会: 東京都内湾漁業興亡史, 853 p, 1984.

(2003. 1. 10受付)

ESTIMATION OF THE UPPER AND LOWER CRITICAL DEPTHS FOR EELGRASS BED FORMATION

Kenji MORITA and Akira TAKESHITA

The critical water depths of eelgrass bed formation were considered to be related to two phenomena. The leaves and roots of eelgrass in the shallower area of upper critical depth will be cut off and washed away by the wave action; eelgrass in the deeper area of lower critical depth will die by the decline of net photosynthesis. Authors elucidated the relationships between the upper critical depth on sandy substratum and wave conditions (0.2 of critical shields number, 0.6m/s of orbital velocity), and also between the lower critical depth and net photosynthetic rate (monthly net photosynthetic rate = 0). Net photosynthetic rate of eelgrass is a useful index for the conservation of coastal environment.