

アマモ生長予測モデルの開発と現地検証

金澤 剛¹・鯉渕幸生²・磯部雅彦³

悪化した海域環境を再生させる方策の一つとしてアマモ場造成が挙げられている。アマモ場は光が十分に届き、海底の地形変動が小さい沿岸の砂泥域に分布していることから、これらを指標とした造成のための適地評価がなされ、アマモ場造成の確度を高めるのに役立っている。しかしながら、造成計画地での程度アマモが生長し繁茂するのかを予測し、アマモの造成効果を定量的に評価するための手法は確立されていない。そこで、本研究ではアマモの経年的なバイオマスの変化を予測するために、日射量などアマモの生長因子の季節変動を考慮したアマモ生長予測モデルを開発した。そして、実際に現地で造成したアマモ場の3年間の生長記録に基づいてモデルの検証を行い、その有効性を確認した。

1. はじめに

沿岸の砂泥域に群落を形成するアマモ場は、沿岸生態系の中で物質循環機能、生物の共存機能さらには環境保全機能といった各機能を有し、主要な一次生産の場であるなど非常に重要な役割を果たしている。しかしながら、この沿岸環境において貴重なアマモ場も、現在では沿岸開発にともなう埋立や水質汚濁を要因の一つとしてその面積が著しく減少している(環境省, 2004)。こうした状況のもと、アマモ場の再生が望まれるとともに、東京湾や大阪湾などの悪化した海域環境を再生させる方策の一つとしてもアマモ場の造成が取り上げられている(大阪湾再生推進会議, 2004)。アマモ場造成に関する研究は既に多数報告されており、その成果は造成計画や方法、維持管理まで幅広く取りまとめられている(例えば、海の自然再生ワーキンググループ, 2003)。実際にアマモ場を造成する場合、造成地の設定が重要であり、光の届き易さに関連して水深、砂の動き易さを Shields 数、さらに地形変動量を指標とした造成のための適地評価が提案されており、実際に適地と判定された箇所で行ったアマモ場造成は良好な結果が得られている(金澤ら, 2005)。

ところで、Shields 数等の評価により適地と判定された領域でアマモ場造成を実施した場合、どの程度アマモが生長し繁茂するのかを予測し、さらにはその体内への窒素固定量などを求めて、アマモの造成効果を定量的に評価することは重要である。今村ら(2004)はアマモの生産力・現存量、堆積物の生物・化学環境を再現できるようなアマモ場生態系モデルを提案している。しかしながら、造成後複数年にわたるアマモのバイオマスの経年

変化を予測するための手法はまだ確立されていないと考える。そこで、本研究ではアマモの経年的なバイオマスの変化を予測するために、時々刻々の気象データを与えて日射量などアマモの生長因子の季節変動を考慮したアマモ生長予測モデルを構築することを目的とした。そして、実際に現地で造成したアマモ場の3年間の生長記録に基づいてモデルの検証を行い、その有効性を確認しようとしたものである。

2. アマモ生長予測モデル

アマモ生長予測モデルは Bocci ら(1997)にならない図-1に示すように、生長の外的因子として光量、水温、海水および底質中の栄養塩濃度を考慮することとした。これら外的因子に加え、葉から地下部へのバイオマスの移動、葉の呼吸、地下茎・根の呼吸、栄養塩の外部からの取り込み、さらに生育密度の増加による生長阻害を考慮してアマモのバイオマスを評価することとした。そのためにアマモを地上部と地下部に分けて、葉および地下茎・根のバイオマスの方程式、ならびに窒素を対象としたアマモ体内の栄養塩の方程式の3方程式で表した。葉のバイオマスを $S(\text{gDW}/\text{m}^2)$ として S の時間変化を式(1)のように表した。

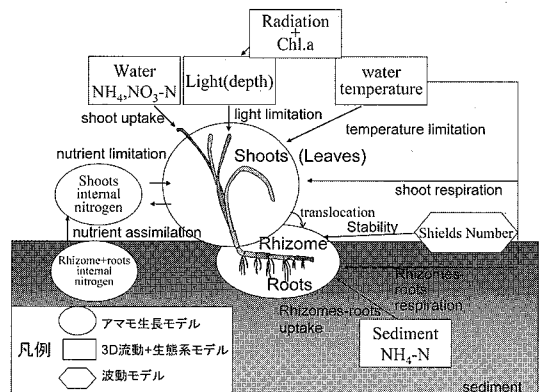


図-1 アマモ生長予測モデルの模式図

1 正会員 工修 東洋建設(株) 鳴尾研究所
2 正会員 博(工) 東京大学講師 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻
3 フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

$$\frac{dS}{dt} = (\mu - trans - \Omega_s)S \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 t は時間、 μ は成長率、 $trans$ は葉から地下部へのバイオマスの移動率、 Ω_s は葉の呼吸率である。成長率 μ は式(2)で表した。

$$\mu = MIMAX \times f(L) \times f(T) \times f(N) \times f(s) \dots\dots (2)$$

ここに、 $MIMAX$ は最大成長率、 $f(L)$ 、 $f(T)$ 、 $f(N)$ および $f(s)$ は光、水温、栄養塩および空間に関する生長制限項であり、それぞれ以下のように表した。

$$f(L) = \frac{L(z)}{L(z) + KL} \dots\dots\dots (3)$$

$$L(z) = L(0) \exp(-kz) \dots\dots\dots (4)$$

$$f(T) = \exp \left\{ - \left(\frac{T - TOPT}{ST} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$f(N) = \frac{N - NMIN}{NCRIT - NMIN} \dots\dots\dots (6)$$

$$f(s) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{S - SMAX}{SL} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $L(z)$ は水深 z における水中光量、 KL は光量に関する半飽和定数、 k は光の消散係数、 T は水温、 $TOPT$ は好適水温、 ST は水温に依存する生長係数、 N はアマモ体内の窒素量、 $NMIN$ および $NCRIT$ は窒素に関する最低内部保持量および限界内部保持量、 $SMAX$ は葉の最大バイオマス、 SL は空間に依存する生長係数である。すなわち、光に関する生長制限は、海域の透明度と水深による光の減衰に依存してアマモの生長が阻害されるとし、水温に関する生長制限は、生育に最適な水温と生育可能な水温の幅を設けて低水温時と高水温時の生長阻害を表した。また、内部栄養塩に関する生長制限は、内部栄養塩が最低保持量以下であればアマモは生長できず、逆に限界内部保持量以上であれば阻害要因にはならないと設定した。空間に関する生長制限はアマモが疎に分布しているときには制限にならないが、密生した状態になるとそれ以上生長できないように設定した。さらに、葉から地下部へのバイオマスの移動率 $trans$ および葉の呼吸率 Ω_s は式(8)および(9)で表した。

$$trans = KTRANS \times \mu \dots\dots\dots (8)$$

$$\Omega_s = SR20 \times f_dec(T) \dots\dots\dots (9)$$

$$f_dec(T) = 0.098 \exp(-4.69 + 0.2317T) \dots\dots (10)$$

ここに、 $KTRANS$ は移動係数、 $SR20$ は20℃における葉の呼吸率、 $f_dec(T)$ は呼吸に関する温度影響係数で

ある。

一方、地下部のバイオマスを R (gDW/m²)として R の時間変化は葉からのバイオマスの移動量と地下部の呼吸量から式(11)のように表した。

$$\frac{dR}{dt} = trans \times S - \Omega_R R \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 Ω_R は根・地下茎の呼吸率であり、20℃における地下部の呼吸率を $RR20$ として次式で表した。

$$\Omega_R = RR20 \times f_dec(T) \dots\dots\dots (12)$$

さらに、アマモの生長に使用可能な体内の栄養塩の変化を表すため、窒素を対象として式(13)のように表した。

$$\frac{dN}{dt} = uptake - \mu \times N \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 $uptake$ は外部からの吸収であり、葉からの吸収と地下部からの吸収に分けて、以下のように表した。

$$uptake = (uptakeS + uptakeR)fb(N) \dots\dots\dots (14)$$

$$uptakeS = uptakeS_{NH_4} + uptakeS_{NO_3} \dots\dots\dots (15)$$

$$uptakeS_{NH_4} = MAXS_{NH_4} \frac{[NH_{4water}]}{[NH_{4water}] + KS_{NH_4}} \dots\dots (16)$$

$$uptakeS_{NO_3} = MAXS_{NO_3} \frac{[NO_{3water}]}{[NO_{3water}] + KS_{NO_3}} \dots\dots (17)$$

$$uptakeR = MAXR \frac{[NH_{4sed}]}{[NH_{4sed}] + KR} \dots\dots\dots (18)$$

$$fb(N) = \frac{NMAX - N}{NMAX - NMIN} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $uptakeS$ は葉の海水からの栄養塩の吸収量、 $MAXS$ は葉の最大吸収量、 KS は葉の吸収に関する半飽和乗数であり、添え字の NH_4 あるいは NO_3 はそれぞれアンモニア態窒素および硝酸態窒素に関することを示す。また、 $uptakeR$ は地下部の栄養塩の吸収量、 $MAXR$ は地下部の最大吸収量、 KR は地下部の吸収に関する半飽和乗数であり、 NH_{4water} 、 NO_{3water} および NH_{4sed} はそれぞれ海水中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素および底質中のアンモニア態窒素量である。さらに、 $fb(N)$ は内部栄養塩濃度であり、 $NMAX$ は最大内部保持量である。

3. モデルの検証

(1) 造成アマモ場の概要

アマモ生長予測モデルの妥当性を検証するため、本モデルを現地で実際に造成したアマモ場に適用した。対象とした造成アマモ場は兵庫県明石市の東播海岸谷八木地区地先において2001年11月に播種シート工法により造成した5m×5mのアマモ場(芳田, 2002; 金澤・森,

2003)である。現地は図-2に示すように2基の突堤に挟まれたポケットビーチ状の地形であり、東側の突堤前面には離岸堤が設置されている。対象アマモ場は、この離岸堤の西側端部背後に位置し、水深は平均潮位を含み約2.5m、底質の中央粒径は約0.3mmであった。この造成アマモ場は、表-1に示すように、造成後約5ヵ月である2002年4月には造成エリア内の発芽生育本数が7本/m²、その2年後の2004年5月では129本/m²と順調に生長し、群落を維持している。なお、この東播海岸のアマモ場では、乾燥重量に関するデータが取得できていなかったことから、2005年6月に兵庫県赤穂市の赤穂海浜公園前の自然のアマモ場において生育密度と乾燥重量および代表葉長に関する調査を実施した。そして乾燥重量と代表葉長の関係を求め、これより東播海岸のアマモ場の乾燥重量を推定した。

(2) 検証のための計算条件

検証用の再現計算は2002年1月から2004年12月までの3年間について実施した。計算に使用した水温は第5管区海上保安本部(2005-9-14参照)による2002年1月から2004年12月までの神戸港での日々の観測値を用いた。水面における日射の推定式にはSavinovの式(水理公式集, 1999)を用い、式中の雲量は、同じく2002年1月から2004年12月までの神戸海洋気象台(2005-9-14参照)による日々の観測値を使用した。光の消散係数は透明度との関係式(消散係数=1.7/透明度)から求めることとし、透明度は大阪湾環境データベース(国土交通省近畿地方整備局, 2005-10-24参照)から抽出した神戸市舞子漁港における公共用水域水質測定調査結果(調査機関:兵庫県)のうち1997年4月から2003年3月の6年間における平均透明度5.17mを使用した。これより、消散係数は0.33とした。また、海域の窒素量は2002年7月から1年間にわたって東播海岸の造成アマモ場で実施した現地観測結果を3カ年にわたって繰り返し使用した。その他、基礎式に含まれる各種パラ

表-1 造成アマモ場の生育数の変化

調査実施日	生育本数 (本/m ²)	代表葉長 (cm)	乾燥重量 (gDW/m ²)
2001/11/17	播種シート敷設		
2002/2/21	7	25	1.34
2002/4/5	7	40	2.09
2002/6/25	34	50	13.03
2002/8/20	30	30	6.68
2002/11/29	17	30	3.72
2003/2/26	37	30	8.17
2003/5/20	51	70	32.83
2004/5/26	129	70	83.20

メータの設定値を表-2に示す(Bocciら, 1997)。このうち、好適水温 $TOPT$ はアマモの分枝・伸長期、開花期にあたる10~20℃程度の範囲とし、水温に依存する生長係数 ST と組み合わせて計算結果の再現性が良い値を使用した。なお、対象アマモ場内の水深は平均潮位を含み2.5mで一定とし、時々刻々の潮位変動は扱わなかった。

(3) 再現計算による検証結果

2002年1月から2004年12月までの3年間の再現計算結果を図-3に示す。図は上から計算に使用した水中光量と気温、計算結果である各生長制限係数および各バイオマスの時系列図である。バイオマスの時系列図には東播海岸の造成アマモ場における観測値を○印で示した。バイオマスの計算結果は、冬から初夏にかけて増大し、夏の終わりから衰退するという季節的な消長を示しており、これはアマモの一般的な生活史におけるバイオマスの季節変動と同じ傾向である。また、計算結果は各年の6月頃にバイオマスが年間の最大値を示しているが、その値は年々増大しており、このアマモ場がまだ生長途中にあることが推測される。こうした計算結果は東播海岸における観測値と良く一致しており、本モデルがアマモのバイオマスの季節的な消長および経年変化を良く再現できることが確認された。

ここで、このアマモ場における生長阻害要因について考察した。各生長制限係数の計算結果によれば、光に関するそれは、水中光量の強弱にともない変化するものの、1年を通じておよそ0.2から0.4の範囲にある。したがって、このアマモ場での生長に対して、光は極端な制約条件にはなっていない。一方、水温に関しては比較的海水温が高い6月ごろから11月ごろにかけて生長制限係数が0となり、この間はバイオマスの増加が期待できない。海水温が低い1月から4月ごろにかけては生長制限係数がほぼ1を示し、この期間は海水温が制限因子にならないことがわかる。なお、栄養塩および空間に関する生長制限係数は常にほぼ1であり、生長阻害要因になっ

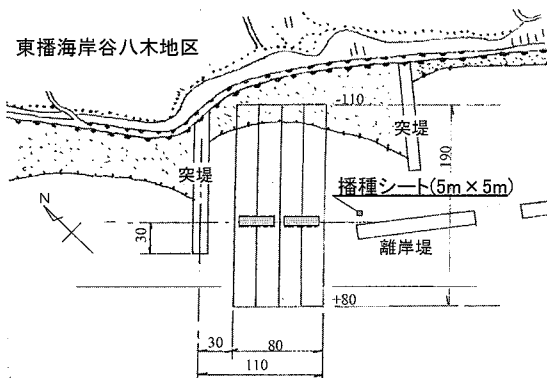


図-2 アマモ場造成位置詳細図

表-2 モデルパラメータ

Name	Parameter	Value	Unit
MIMAX	Maximum growth rate	0.06	day ⁻¹
KTRANS	Translocation coefficient	0.25	day ⁻¹
KL	Semisaturation constant	500	Kcal m ⁻² day ⁻¹
TOPT	Optimal temperature	10	℃
ST	Growth dependence on temperature	6.0	℃
MAXS _{NH4}	Shoot maximum uptake for NH ₄	0.3	mgN gDW ⁻¹ h ⁻¹
KS _{NH4}	Shoot half-sat. constant for NH ₄	0.13	mgN l ⁻¹
MAXS _{NO3}	Shoot maximum uptake for NO ₃	0.06	mgN gDW ⁻¹ h ⁻¹
KS _{NO3}	Shoot half-sat. constant for NO ₃	0.23	mgN l ⁻¹
MAXR	Rhizome-root maximum uptake for NH ₄	0.02	mgN gDW ⁻¹ h ⁻¹
KR	Rhizome-root half-sat. constant for NH ₄	0.9	mgN l ⁻¹
NMIN	Minimum internal nitrogen quota	5	mgN gDW ⁻¹
NCIRT	Critical internal nitrogen quota	15	mgN gDW ⁻¹
NMAX	Maximum internal nitrogen quota	30	mgN gDW ⁻¹
SR20	Shoot respiration rate at 20 ℃	0.025	day ⁻¹
RR20	Rhizome-root respiration rate at 20 ℃	0.015	day ⁻¹
SMAX	Maximum shoot biomass	500	gDW m ⁻²
SL	Growth dependence on space availability	5	gDW m ⁻²

ていない。こうしたことから、このアマモ場では夏の高温がアマモの生長に大きく影響していることがわかる。逆に他海域も含めてアマモ場造成を実施する場合、東播海岸より夏の海水温が低く、かつ透明度が高い海域が対象地として有望であると考えられる。

(4) バイオマスの収束に関する検討

図-3 に示したように、造成後3年間の再現計算結果では、このアマモ場が生長途上であることが示唆された。実際のアマモ場は、突発的な悪影響がない限り、その環境に応じたある生育密度まで生長し、その後は定常状態に達すると思われる。そこで、再現計算に引き続き、7年目までの予測計算を実施した。計算に使用した水温および雲量は、再現計算で使用した3カ年の観測データから1年間のモデルデータを作成し、繰り返し使用した。4年目から7年目までの予測計算結果を図-4に示す。図は上の2段が各生長制限係数、下段が各バイオマスの時系列図である。各生長制限係数の計算結果によれば、光、水温および栄養塩は図-3の再現計算結果と同一の傾向を示している。しかしながら、空間に関する生長制限係数は、5年目以降、6月頃に有意な極小値を示し、6年目と7年目の極小値は0.2程度とほぼ同じ値を示している。バイオマスの計算結果をみると、この空間に関する生長制限係数が影響して、6年目と7年目のバイオマスの年間最大値が同程度の値を示しており、このアマモ場が定常状態に達したと予測された。計算で得られた最大バイオマスは600 gDW/m²程度であり、この値は2005年5月における造成地内の実測最大値470 gDW/m²あ

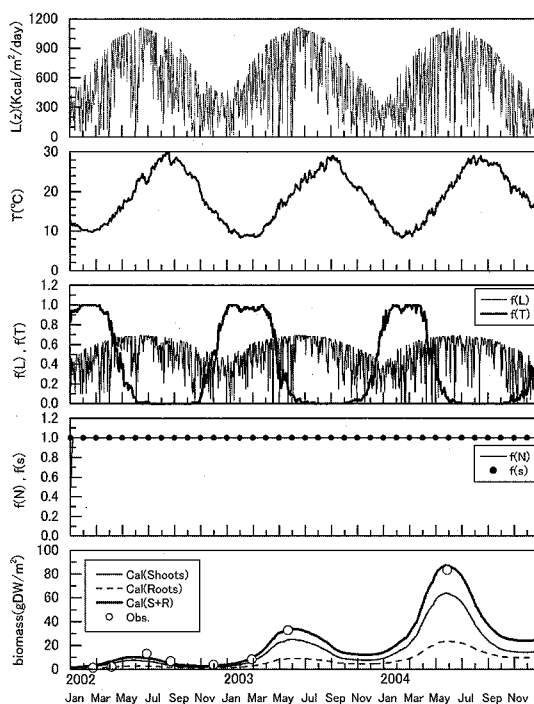


図-3 再現計算結果

るいは造成地に隣接して存在する自生アマモ場での代表的な値750 gDW/m²と同程度であって、計算結果が現実的な値であることが確認された。

本モデルには台風などのイベントを考慮していないた

め、アマモ場の突発的な衰退は取り扱っていない。したがって、造成したアマモ場が何年で定常に達するか、正確に予測することは難しい。しかしながら、突発的なイベントがなくても定常に達するまで6年から7年かかるとした本計算結果によれば、現地においてもアマモが十分に繁茂するには数年が必要であり、その間、モニタリングの継続と適切な維持管理の必要性が示唆される。

4. ま と め

アマモの経年的なバイオマスの変化を予測するために、日射量などアマモの生長因子の季節変動を考慮したアマモ生長予測モデルを構築し、現地データによりその妥当性を検証した。得られた結果を以下にまとめる。

- ①造成後3年間の再現計算を実施した結果、本アマモ生長予測モデルは造成アマモ場のバイオマスの季節的および経年的な変化を良く再現した。
- ②この造成アマモ場では、夏の高水温が主たる生長阻害要因であると推察された。
- ③再現計算に引続いて実施した予測計算結果によれば、本アマモ生長予測モデルでも、その適用地の条件によってアマモ場のバイオマスがある値に収束することが示された。
- ④このバイオマスの収束値は、造成地内の実測最大値あ

るいは造成地に隣接して存在する自生アマモ場における代表的な値と同程度であった。

これより、Shields 数等の評価によりアマモの生育適地と判断した領域でアマモ場造成を行う場合、本モデルにより造成後複数年にわたってアマモのバイオマスを予測することが可能となった。ただし、本モデルには台風などのイベントは考慮されていないため、アマモ場の生育密度が定常状態に達するまでの期間を定量的に評価する場合には注意が必要である。また、再現計算を通じて、アマモの生長に大きな影響を及ぼす水温に関しては、適用海域により方程式中の係数をチューニングする必要性が示唆されており、今後のデータの蓄積が課題である。

参 考 文 献

- 今村正裕・本田正樹・松梨史郎・川崎保夫(2004): アマモ場生態系モデルの構築とその適用, 電力中央研究所報告, U03063, 22p.
- 海の自然再生ワーキンググループ(国土交通省港湾局監修)(2003): 海の自然再生ハンドブック その計画・技術・実践, 第3巻藻場編, ぎょうせい, 110p.
- 大阪湾再生推進会議(2004): 大阪湾再生行動計画, 45p.
- 金澤 剛・森 鐘一(2003): 現地アマモ場造成試験と適地評価に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1266-1270.
- 金澤 剛・明松正二・多賀 博・稲田 勉(2005): も場衰退海域におけるアマモ場再生試験について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp. 677-682.
- 環境省(2004): 藻場の復元に関する配慮事項, 100p.
- 神戸海洋気象台; 気象観測表(オンライン), http://www.kobe-jma.go.jp/Shiryu/Geppyou/Geppyou_index.html, 参照 2005-9-14.
- 国土交通省近畿地方整備局: 数値情報データベース, 大阪湾環境データベース(オンライン), <http://kouwan.pa.kkr.mlit.go.jp/kankyo-db/suuchi/suuchi.asp>, 参照 2005-10-24.
- 第5管区海上保安本部海洋情報部; 神戸港の水温(オンライン), <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN5/index.html>, 参照 2005-9-14.
- 土木学会編(1999): 水理公式集, pp. 585-588.
- 芳田利春(2002): 「播種シートによるアマモ場造成法」の開発, Marine Voice21, Vol.225, pp. 14-16.
- Bocci, M., G. Coffaro, G. Bendoricchio(1997): Modelling biomass and nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina* L.): applications to the Lagoon of Venice (Italy) and Oresund (Denmark), Ecological Modelling, 102, pp. 67-80.

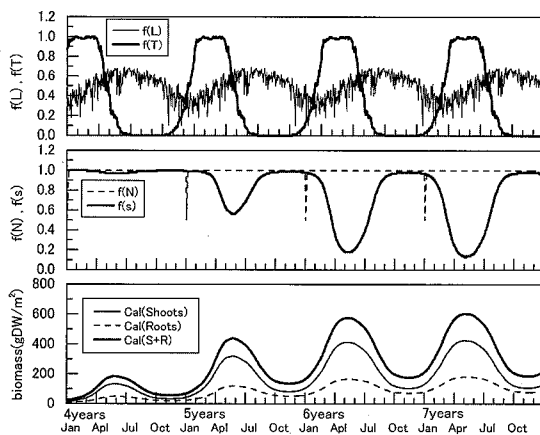


図-4 予測計算結果