

藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発 (第 2 報)

桑原伸司*・松山 恵二**・竹田義則***・北原繁志****
 清野克徳*・金川 均*・谷野賢二*****

1. はじめに

沿岸構造物の配置計画や構造検討において、現在は藻場の近傍に建設される防波堤に藻場創出機能を付加するなど、藻場の保全や造成を意図した構造・配置の検討が試みられている(北海道の事例として釧路港、様似漁港など)。構造・配置の検討においては、藻場造成の効果や構造物の影響による藻場の変化を事前に評価することが重要であるが、現状ではこれらを定量的に評価する手法は確立されていない。そこで筆者らは北海道西海岸の優先種であるホソメコンブ(以下、コンブ)を対象に、生産量を光・波浪・流況・栄養塩等の物理化学的環境条件の変化で表現することを試みてきた。その第一段階として、光合成による生産速度式を基本に、それを積算して得られる総生産量の算定モデルを提案し、ホソメコンブの月別総生産量の変化を再現することをすでに報告している(桑原ら, 1998)。しかし、このモデルにおける総生産量は光合成のみを考慮しており、計算結果を実海域におけるホソメコンブ生残量として扱うには、光合成以外で総生産量に影響を与える要因も考慮する必要がある。そこで本研究では次の段階として、これまでの手法を発展させ実用化することを目的に、光合成以外で生残量に影響を与える要因とその程度を明らかにし、生残量を算定する手法を確立したものである。また、栄養塩濃度が総生産量算定において重要なパラメータであることがこれまでの研究で明らかになったため、栄養塩濃度に着目した成長実験を行い、算定精度を向上させる。

2. 総生産量の算定方法と実用化方針

(1) 基本式

Monsi・Saeki (1953) が確立した植物群落の光合成速度と光強度の関係をもとに、松山 (1998) は次に示す総生産量推定式を構築した。

$$P_g = \frac{2Db}{Ka} \ln \frac{1 + [1 + \{K/(1-m)\}a(I_M \cdot \tau/100)]^{1/2} \times 30}{(1 + [1 + \{K/(1-m)\}a(I_M \cdot \tau/100)]^{1/2} \cdot \exp(-KF))^{1/2}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P_g : 群落の総生産量 (gwet/m²/月)、 a : b/a は光飽和値での光合成速度 ($\mu\text{gC}/\text{cm}^2/\text{hr}$)、 b : 光合成-光曲線の立上がり勾配、 K : 群落吸光係数、 I_M : 日南中時の光強度 ($\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$) で緯度・水深・海中の吸光係数の関数、 D : 日長 (hr)、 F : 葉層全体の葉面積指数 (m^2/m^2)、 m : 葉状体部の光の透過率、 τ : 群落の葉層上面までの光減衰率、で与えられる。

我々はこの推定式を用いて、海洋構造物の影響を受ける波浪流況、水質を総生産量式に取込むことを試みた。

(2) 総生産量の算定方法

式(1)中の各係数の多くは生態特性で表現され、本モデルで扱う流況や栄養塩濃度等の環境要因は係数の中に取込まれている。そこで総生産量の算定にあたっては図-1に示すとおり、①式中の変数を光強度のみとした光強度生産量と、②生態特性値に代わり光強度生産量と総生産量を関係づける係数(生産率 α)、を考慮した新たな総生産量式を構築した。取り上げた変数及びその扱いを表-1に示した。

(3) 実用化へ向けの方針

海象や水質調査結果、成長実験結果をもとに各変数を決定し、調査・実験結果と比較して総生産量式の妥当性を確認した。そこで次の段階での研究として、実際の海域での現存量に対応させるため、光合成以外の要因である先枯れ(溶脱)、個体流出、ウニ類等による摂餌を定式

* 正会員 北日本港湾コンサルタント(株)
 ** 北海道立栽培漁業総合センター
 *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
 **** 正会員 北海道開発局苫小牧港湾建設事務所
 ***** 正会員 工博 北海道東海大学工学部海洋開発工学科

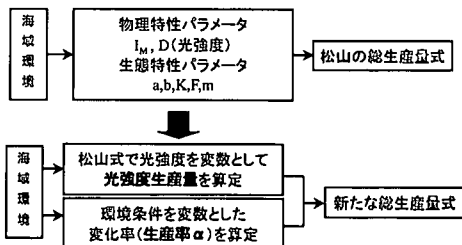


図-1 総生産量式の構築要素

表一 算定に用いた変数とその扱い

光強度生産量			生産率 α		
変数	使用データ	算定方法	変数	使用データ	算定方法
①水深	現地データ	現状式に 入力	①水温	現地データ	既往文献より
②日射量			②波浪・流況		現地実験より
③日長			③栄養塩濃度		現地実験より
④懸濁物質					
⑤K, F	生産量で 推定				
⑥他の係数	年間 平均値				

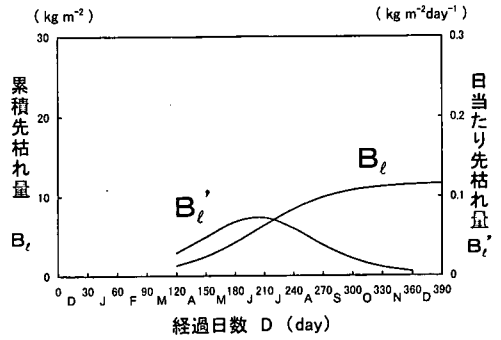


図-2 経過日数と先枯れ量の関係

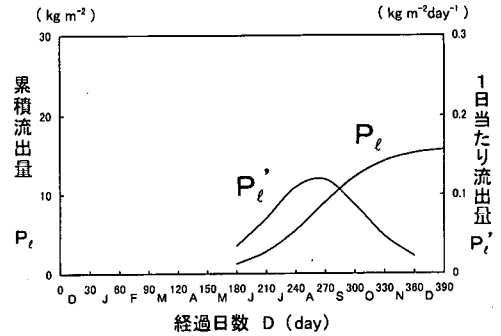


図-3 経過日数と流出量の関係

化する。

3. 生残量の算定方法

(1) 基本的な考え方

海域における海藻類の生残量は、光合成による個体の増加量から、先枯れ量、個体流出量、ウニ類等による摂餌量を差引いた重量の累計で示される。

$$\begin{aligned}
 (\text{生残量}) &= \sum((\text{光合成による増加重量 } P_n) \\
 &\quad - (\text{先枯れ量 } B_l) - (\text{流出量 } P_l) \\
 &\quad - (\text{摂餌量 } S_l))
 \end{aligned}$$

各要因の算定のうち、 P_n , B_l , P_l に関する研究例は極めて少ないため、松山 (1998) が忍路湾で過去に実施した調査を取りまとめた結果を用いた。また S_l については、キタムラサキウニに関する既往の文献と 1997 年に忍路湾で実施した調査結果より算定した。

(2) 光合成による増加重量

光合成による増加重量 P_n とは、総生産量 P_0 から、付着器や葉状体の総呼吸量 (呼吸により減少する重量) を差引いたものである。

これまで用いてきた総生産量式では P_0 を算定しているため、生残量を求めるためには P_0 を P_n に変換する必要がある。 P_0 と P_n の関係については、松山が忍路湾のホソメコン片を用いて室内実験にて明らかにしている。それによると、忍路湾での年間総光合成量 P_0 は $58 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2$ であるのに対し、純生産量 P_n は $31 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2$ であり、この差約 4 割が呼吸で消費されていることがわかる。月別の P_n/P_0 比の関係は、表-2 に示すとおりで、この関係を用いて P_0 を P_n に換算することとした。

(3) 先枯れ・流出量の算定

松山は忍路湾内のウニ類の食害を受けないホソメコン

表-2 忍路湾での月別 P_n/P_0 比

月	12	1	2	3	4	5
P_n/P_0	0.616	0.495	0.534	0.693	0.656	0.610
月	6	7	8	9	10	11
P_n/P_0	0.509	0.389	0.349	0.161	-0.090	-0.549

ブ群落において、経過日数毎の先枯れ・流出量の詳細な調査を行っている。それをロジスティック曲線で近似した結果を、図-2, 3 に示す。結果によると先枯れ量は 6 月に最大で $0.074 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2/\text{day}$ 、年間累計では $12 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2$ 、また流出量は 8 月に最大で $0.121 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2/\text{day}$ 、年間累計では $16 \text{ kg} \cdot \text{wet}/\text{m}^2$ となる。この関係を、生残量算定に用いた。

(4) キタムラサキウニの摂餌量算定

ウニ類の摂餌を流速と関係付けて検討した報告としては、桑原ら (1998) や佐々木ら (1998) がある。本モデルに組み込むには、流速と摂餌の関係を定量的に示す必要がある。そこで個体当たりの摂餌量、流速による個体の摂餌圧変化、流速による分布個体数の変化について以下のような考えた。

a) 個体当たりの摂餌量

ウニ類の個体当たりの摂餌量は、個体年齢、時期 (水温)、餌料環境によって異なるものである。これらを考慮した摂餌量に関する既往の知見が極めて少ないため、菊地 (1984) が示したキタムラサキウニの管理上必要な餌料量を、平均的な摂餌量として扱った。このうち漁獲サイズに達するキタムラサキウニ (4 年目) の 1 個体当たり必要餌料量を表-3 に示す。

b) 流速による摂餌の変化

表-3 キタムラサキウニの必要餌料量 (1個体当たり)

月	12	1	2	3	4	5
餌料量	56.11	53.01	35.00	37.82	46.50	68.20
月	6	7	8	9	10	11
餌料量	105.90	138.26	170.19	153.30	120.28	77.10

注) 餌料量の単位は g/月 菊地 (1984)



写真-1 実験装置

一般的にウニ類の摂餌は、波浪や流況といった環境条件の影響を受ける。本モデルにおいては、流れの影響による個体の摂餌量の変化を考慮するため、川俣 (1994) が振動流水槽で行ったキタムラサキウニの摂餌実験で得た以下の式を用いた。ここで式中の F は日間接触摂餌量、 F_s は静水中での摂餌量、 U_{max} は振動最大流速、 F/F_s は摂餌圧である。

$$\frac{F}{F_s} = 1 - \exp\left[-\exp\left(-\frac{U_{max} - 27.1}{4.27}\right)\right] \dots\dots (2)$$

c) 流速による個体数の変化

流速の変化はウニ類の個体当たりの摂餌量を変化させるとともに、分布個体数にも影響を与えたと考えられる。北海道開発局開発土木研究所では、忍路湾及びその周辺海岸で波浪・流況及びキタムラサキウニの分布調査 (1997) を行った。調査結果をもとに、調査地点別に年平均流速と分布個数の関係を調べたところ、流速の増加に伴いキタムラサキウニの分布個数は減少し、流速 30 cm/s 以上の地点では殆ど分布していないことが明らかになった。本モデルではその結果を用い、各計算メッシュの月別流速毎にキタムラサキウニの分布個数を設定した。

以上の結果より、摂餌量を次の様に算定した。

$$\begin{aligned} \text{(摂餌量 } S_i) &= \{\text{個体の摂餌量(月で規定)}\} \\ &\quad \times \{\text{個体の摂餌圧(流速で規定)}\} \\ &\quad \times \{\text{個体の分布数(流速で規定)}\} \end{aligned}$$

4. 栄養塩濃度とホソメコンブの成長

これまで栄養塩が総生産量に与える影響は、1997年に実施した室内実験の結果を、生産率 a の一部として総生産量式に取込んでいた。この室内実験は、流速による成長量の変化を見ることに主眼を置いており、直接栄養塩濃度の影響を評価することはできなかった。そこで基本となる総生産量式の精度向上のため、栄養塩濃度のみに着目した栄養塩吸収実験を行った。

(1) 実験装置と実験方法

海水循環器と加温冷却器を装着した水槽 (90 cm × 45 cm × 45 cm, 容量 150 l) を 3 台用意した (写真-1)。

実験は各回とも 7 日間とし、計 5 回実施した。実験試料は、忍路湾で採取したホソメコンブの根と先端部を切

表-4 実験期間と設定濃度

回数	実験期間	硝酸態窒素濃度 ($\mu\text{g-at}/\ell$)
第1回	10年6月9日~6月16日	0, 5, 10
第2回	10年8月4日~8月11日	
第3回	10年10月6日~10月13日	
第4回	11年2月8日~2月15日	
第5回	11年5月14日~5月21日	

断して 30 cm に整え、各水槽に 3 試料づつセットした。水槽の栄養塩 (硝酸態窒素) 濃度は、実験期間中 ESI 培養液で所定の濃度に維持するため、実験期間中は 1 日 2 回の水質分析と ESI 培養液の添加を行った。実験項目はホソメコンブの湿重量・栄養塩含有量 (実験前後)、水質、である。実験期間と、各水槽の設定栄養塩濃度を表-4 に

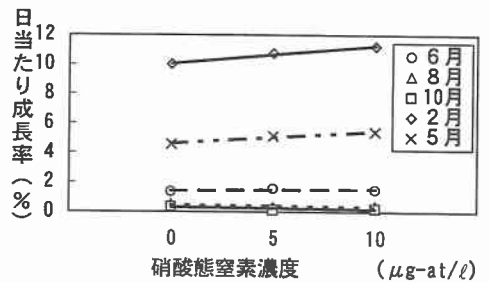


図-4 栄養塩濃度別の成長率

表-5 個体内の硝酸態窒素含有量

水槽濃度 ($\mu\text{g-at}/\ell$)	硝酸態窒素含有量 (%)									
	第1回		第2回		第3回		第4回		第5回	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
0	1.9	1.5	1.7	1.7	1.9	1.8	2.7	1.8	2.8	2.0
5	2.0	1.9	1.8	1.9	2.2	1.9	3.5	4.0	2.7	3.0
10	1.6	1.8	1.8	2.0	2.0	1.9	3.1	6.3	2.7	2.9

注) 前とは実験開始時、後とは実験終了時

示す。

(2) 実験結果

栄養塩濃度別の成長率（1日当りの重量増加率）を図-4に、個体内の硝酸態窒素含有率を表-5に示す。栄養塩濃度-成長率の関係をみると、実験時期の違いによる成長率は、2月が10%以上と最も大きく、6月以降は2%以下と小さくなっている。一方栄養塩濃度の違いによる成長率は、成長率の大きい2、5月で濃度勾配を持つが、他の時期では成長率の変化はみられなかった。この実験では栄養塩濃度が $0 \mu\text{g-at}/\ell$ の場合でも成長しており、以下で述べるように体内に蓄積された栄養塩が光合成に利用されたものと推定できる。

個体内の硝酸態窒素含有率は、概ね1.7%以上でMizuta (1997) が示した光合成に必要な下限値1.3%を上回っているため、各試料とも光合成を行える状態にあった。含有率の実験前後の変化を見ると、上記の推定のおり、栄養塩が低濃度の場合には体内の含有率が減少し、逆に高濃度のときには含有率が増加する。これは、低濃度の場合には光合成で体内の硝酸態窒素を消費する一方なのに対し、高濃度の場合には吸収後に光合成で消費し、さらに余剰分を体内にも蓄積していることを示している。今回の実験期間は各回とも7日間であるため、低濃度の場合でも光合成下限値には達していないが、実験期間が長い場合には栄養塩濃度差による成長率の差は拡大するものと考えられる。本モデルではホソメコンブの生育可能な海域が対象で、低濃度により含有量が光合成下限値を下回することはほとんどないと考え、7日間の実験結果を総生産量式に導入する。

(3) 総生産量式への導入

今回の実験では、成長初期の成長は高いが、時間の経過とともに成長率は低下し、さらに栄養塩濃度に依存しない結果となった。本モデルの栄養塩濃度と成長の関係については、前報の硝酸態窒素濃度と生産率 α の関係を基本としているため、実験結果は栄養塩の利用効率として扱った。この利用効率とは、時間の経過によりホソメコンブはどの程度の効率で栄養塩を利用できるかを見た指標である。利用効率は、ホソメコンブの発芽からの経過日数（12月から）を変数に、各回の平均成長率を最大月の2月で規格化したもので、その変動を図-5に示す。なお、12月～2月までの期間については、便宜上、利用効率を1.0として扱った。

この栄養塩吸収係数を用いて、総生産量（ P_0 ）の再現性を確認した結果が図-6である。年間累計した P_0 は、忍路湾57 kg（調査結果）、前報58 kg、今回50 kgと、現地よりも約12%ほど少ない結果となった。しかし、2倍程度あった最大値がほぼ一致したこと、4月だけのピークが4、5月に分散したことなど、全体の再現性は向上

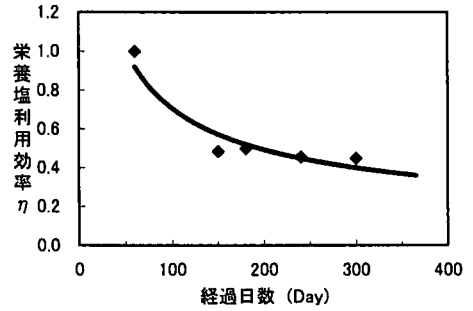


図-5 経過日数と利用効率

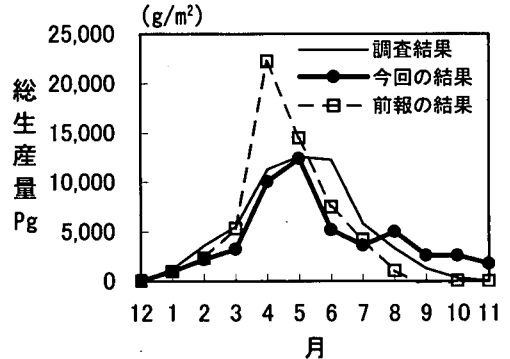


図-6 利用効率による再現性の変化（単位： $\text{g}/\text{m}^2/\text{月}$ ）

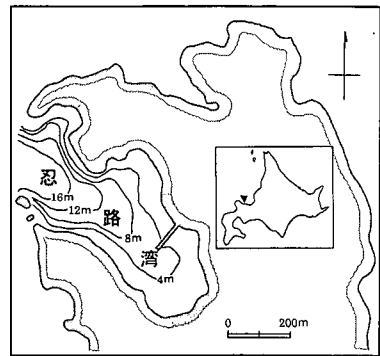


図-7 対象海域（忍路湾）の形状

させることができた。

5. 空間分布モデルへの適用

これまでに検討した生残量の算定方法や、修正した総生産量式を用いて、前報と同様に忍路湾にてモデルの適用を試みた。忍路湾は、北海道小樽市西方にある日本海に面し、図-7に示す湾口約300 m、奥行約800 mの湾である。湾内は比較的静穏で、ホソメコンブの群落が形成されている。なお、生残量への換算及び利用効率以外の計算条件は、前報と変更はない。

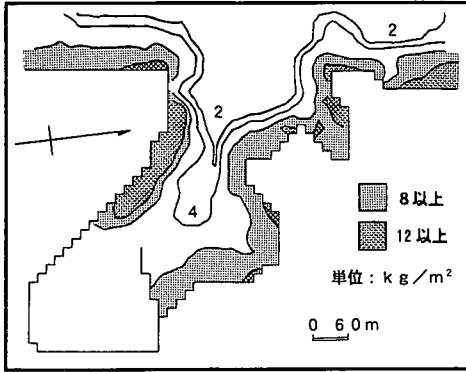


図-8 湾内のホソメコンブ生残量 (4月)

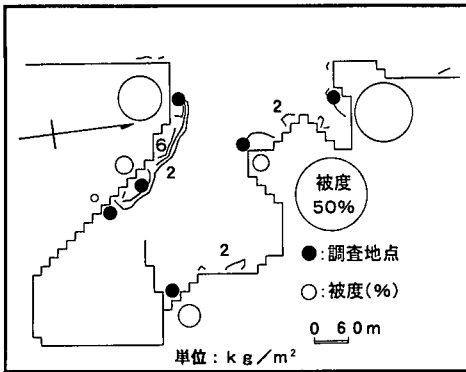


図-9 湾内のホソメコンブ生残量 (8月)

(1) 計算手法

総生産量式中の変数のうち、光強度算定に必要な緯度(海面の日射量)・水深・懸濁・日長は現地観測データより設定した。水温は船野(1983)による1948~67年の湾内平均値、栄養塩濃度(硝酸態窒素)は1980~84年の平均値を用いた。流速は、エネルギー平衡方程式で得る湾内の波高分布から質量輸送速度を求め、対象海域周辺の恒流成分(1 cm/s)を加えた。

波浪条件は開発局資料(1994)を参考に、近隣で地形特性が類似している石狩湾新港でのエネルギー平均波高を用いた。

(2) 計算結果

生残量の計算結果のうち、代表的な例として4月と8月の計算結果を図-8, 9に示す。4月の計算結果では、流速の遅い湾中部でウニの摂餌が強いいため生残量が少なく、汀線際との差が非常に大きく現れている。また、8月の計算結果では先枯れ・流出の影響を受け、湾内の生残量は非常に減少し、大きな群落は湾口西部に残すのみとなっている。この8月の結果には、平成9年

8月に調査した海藻被度分布調査結果も併せて示しているが、概ね再現しているものと思われる。

船野(1983)によると、湾口のホソメコンブ現存量(調査結果)は地点により差があるものの、夏期の最大で10 kg/m²程度の個所も存在している。前報での報告では8月の最大量が30 kg/m²と計算されていたが、今回は7 kg/m²程度となり生残量の絶対値に関しても、ほぼ整合することができた。

6. おわりに

今回の検討により、先枯れ・流出、ウニ類の摂餌といった生残量に影響を与える要因を定量化してモデルに組み込み、忍路湾内で概ね再現することができた。また、栄養塩濃度に着目した成長実験結果を用い、総生産量式の再現性が向上した。これらの改良により、本モデルは実際の海域におけるホソメコンブの生残量を予測・評価する手法として実用化できることを示した。

今後は、このモデルで用いる変数のうち、生残量に与える影響の大きい、栄養塩濃度、ウニ類の分布状況についてのデータを蓄積するとともに、多くの海域での検証を進めていくことが望まれる。

なお、栄養塩吸収実験にあたり北海道大学忍路実験場及び北海道立中央水産試験場に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 川俣 茂 (1994): 磯根漁場造成における物理的攪乱の重要性, 水産工学, Vol. 31, pp. 103-110.
- 菊地省吾 (1984): 植食動物密度の管理基準.
- 桑原伸司・佐々木秀郎・北原繁志・松山恵二・沼野克徳・谷野賢二(1998): 藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1101-1105.
- 桑原久美・川井唯史 (1998): 北海道忍路湾における波浪, ウニの摂食および海藻の関係, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1071-1075.
- 佐々木秀郎・竹田義則・北原繁志・鳴海日出人・袖野宏樹 (1998): 沿岸構造物における海藻群落形成に必要な光と流れに関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1166-1170.
- 船野 隆 (1983): ホソメコンブの生態第1報及び第2報, 北水試報告, 第25号, pp. 61-186.
- 北海道開発局開発土木研究所(1997): 岩礁性海岸環境調査業務.
- 北海道開発局港湾部 (1994): 港湾・漁港波高出現率算定業務.
- 松山恵二 (1998): ホソメコンブの光合成並びに光合成より見た忍路湾におけるホソメコンブの生産 (未発表).
- Mizuta, H., K. Torii & H. Yamamoto (1997): The relationship between nitrogen and carbon contents in the sporophytes of laminaria japonica, Fisheries Science, 63, pp. 553-556.
- Monsi, M. and T. Saeki (1953): Uber den lichtfaktor in den pflanzengesellschaften und seine bedeutung fur die stoffproduktion. Jap. Jour. Bot., 14, 22-52.