

藻場生産力予測シミュレーションモデルの開発

桑 原 伸 司* 佐々木秀郎**・北 原 繁 志***
松 山 恵 二****・清 野 克 徳* 谷 野 賢 二*****

1. はじめに

近年, 海洋資源の減少や海洋環境保全への関心の高まりを背景に, 海洋土木の分野では水産動植物の生息繁殖に重要な役割を持つ藻場の造成技術開発が行なわれてきた。中でも防波堤や離岸堤等, 沿岸構造物の建設が藻場の生育環境に与える影響を定量的に予測するモデルの開発は, 今後の沿岸開発や環境影響評価等において求められている。

筆者ら (1997) は, 植物群落の総生産量推定式を海藻群落に適用すると, ホソメコンブ群落の生産力 (生産ポテンシャル) は光強度・水温・流速・栄養塩等を変数として推定できることを示した。本研究は, 生産量式の構築と実海域での再現性の確認を目的に, 海域の重要な環境要因の一つである流速と栄養塩に着目した藻類の生産実験と数値シミュレーションを行なったものである。

2. 藻場生産力予測モデル

(1) ホソメコンブの生態

対象としたホソメコンブ (褐藻綱 コンブ目 コンブ科) は, 北海道西海岸においてほぼ周年にわたり優先種として生育する 1 年生海藻である。その個体・群落は, 漁獲対象や餌料海藻, 海生生物の生息場所として重要である。生態特性は, 孢子体が 12 月～3 月にかけて出現し, 長さ 60 cm～2 m, 幅 6～10 cm, 茎の長さ約 5 cm まで成長する。分布域は低潮線付近から漸深帯で, 岩上に群落を形成して生育する。

(2) モデルの基本的な考え方

海藻類の生育・分布に影響を与える要因は, 物理的要因・化学的要因・生態的要因であるが, そのうち沿岸構造物の影響を受ける要因は, 波浪・流況・水質等が中心である。流速や栄養塩濃度が海藻の光合成に与える影響については, Chapman (1978) らの研究により実験的に求められており, 流速が速いほど・栄養塩濃度が高いほど

光合成が促進するとされている。そこで今回開発した生産量モデルは, 次の 3 つの基本的な考え方に基づき構築した。①海洋構造物の影響を受ける波浪・流況・水質を生産量式に取込む, ②藻類個々の状態 (生息本数・個体重量・品質) には着目せず単位面積当りの生産量を予測する, ③予測期間はホソメコンブの生態特性を踏まえ 1 年間とする。

(3) 生産量式

a) 基本式

Monsi & Saeki (1953) は, 植物群落の光合成速度と光強度の関係から生産量推定式を確立した。この推定式より松山 (1998) は, 以下のホソメコンブ群落の生産速度推定式を導いた。

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

ここで, P_g : 群落の日単位総生産速度 (gwt/m²/day), 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 ($\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$) 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。

これまでの推定式では, 光合成速度や生産速度・生産量を混同している例が見うけられる。そのため本研究では (1) 式で総生産速度が算出され, それを積算したものを総生産量と定義する。

(1) 式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, 忍路湾で松山 (1998) が調査した表—1 に示す各係数等から, 生産量式の変数を生態特性から環境要因へ変更することを試みた。

b) 生産量式への環境要因の導入方法

表—1 中の各係数のうち, 生態特性を表す係数は a , b , m , K , F である。このうち, K , F は群落の生産量で規定される係数であるため, 表—1 の生産量との関係より

* 正会員 北日本港湾コンサルタント㈱
** 正会員 北海道開発局港湾部港湾建設課
*** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
**** 北海道立栽培漁業総合センター
***** 正会員 工博 北海道東海大学工学部海洋開発工学科

表一 忍路湾内群落での各係数

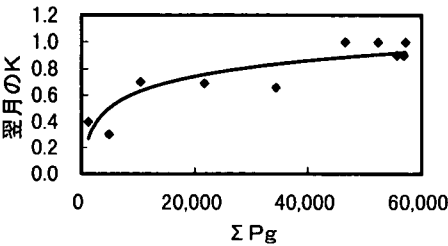
係数	12月	1月	2月	3月	4月	5月
a	0.0307	0.0196	0.0197	0.0212	0.0360	0.0353
b	0.1464	0.1220	0.1803	0.2332	0.3394	0.3242
m	0.27	0.27	0.30	0.28	0.27	0.28
D	7	9	11	11	12	14
I_M	365	400	518	757	948	785
K	0.75	0.50	0.40	0.30	0.70	0.69
F	0.02	1.32	2.20	2.66	6.90	9.00
P_g	14	1,211	3,591	5,524	11,298	12,592
係数	6月	7月	8月	9月	10月	11月
a	0.0556	0.1046	0.0850	0.0954	0.0935	0.0480
b	0.4040	0.3971	0.2837	0.2647	0.2474	0.1084
m	0.20	0.11	0.07	0.10	0.07	0.07
D	14	14	13	12	11	9
I_M	912	1125	895	973	890	417
K	0.66	1.00	1.00	0.90	0.90	1.00
F	13.30	7.57	3.49	1.49	0.40	0.07
P_g	12,264	5,802	3,276	1,271	307	34

推定する。

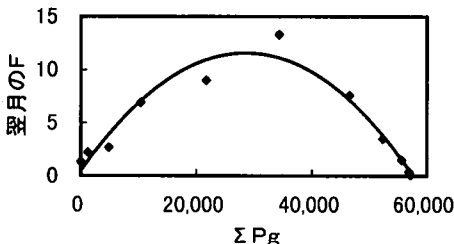
一方、 a, b, m は季節変化が大きいため、その変化は水温、流況(波浪)、栄養塩濃度等の環境変化に依存していると考えられる。そこで①光強度を変数とした年平均生産速度と②生態特性を規定する環境変化が生産速度に与える影響、を考慮した新たな生産量式を提案する。①については(1)式で変数の a, b, m を定数(年平均値)とし光強度のみを変数として扱った。②については環境変化と日当り生産率(生産速度増加率 $\alpha\%$)変化の関係を導いた。このうち流れ及び栄養塩と生産率の関係は、現地実験で明らかにする。

c) K, F の推定

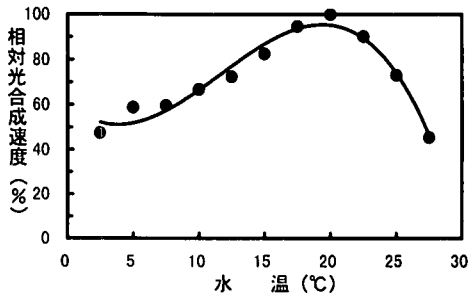
K, F は生産量に依存するため、表一の既往データを



図一 K と ΣP_g の関係



図二 F と ΣP_g の関係



図三 水温と相対光合成速度

用いた。月毎の累積生産量 ΣP_g と、影響を受ける翌月の K, F の関係は図一、二のとおりである。

d) 水温と生産率

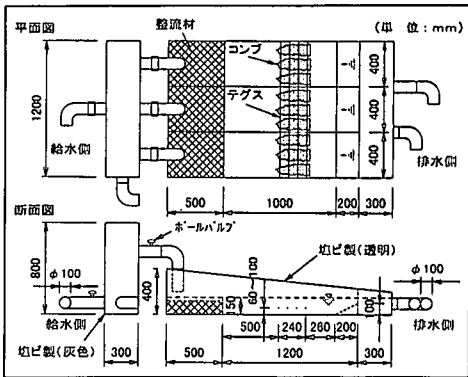
水温とコブ類の光合成に関する既往資料は、リシリコブの新原(1975)やホソメコブの松山(1998)などがある。これらに共通なのは、水温と光合成の関係にはピーク水温が存在し、その前後では光合成速度が減少すると指摘していることである。水温と光合成速度について、松山の調査結果を用いて最大を100とした相対光合成速度を図一三に示す。定義した生産率は環境変化による生産速度の変化率で、また生産速度変化は光合成速度に関係する。水温による生産率は、年間水温と図一三から求まる年間光合成速度からの増減率となる。

3. 流速・栄養塩濃度と生産率

(1) 実験装置と実験方法

a) 実験装置

実験は流速を各々変化できる3連水路(図一四)を製作し、北海道大学忍路臨海実験場に観測小屋を設置して行なった。水路にはコブを保持するテグス4本を張り、汲み上げた海水を給水槽に溜め、バルブにより流量を調整し所定の一方向流を発生させた。



図一四 実験装置

照明は外光を遮断して各水路に蛍光灯 (20 W) を 4 本ずつ配置し、一定照度となるように配慮した。照明点灯時間は、4～18 時の 14 時間とした。

b) 実験方法

実験に用いるホソメコンブは、実験箇所近傍の水深約 0.7 m の箇所から採取し、根と先端部を切断し生産量の大きい根から 30 cm の長さに統一した。各水路では個体差を除くため 3 本ずつ配置し、合計で 9 本とした。実験開始前・終了時に湿重量を精密電子天秤で測定し、開始時の重量で増加重量を除して生産率を求めた。

c) 実験時期

実験は 1 回当たり約 1 週間連続し、生産量の大きい 5～6 月を中心に計 5 回行なった。実験期間と設定流速を表-2 に示す。

表-2 実験期間と設定流速

回数	実験期間	設定流速 (cm/s)
1 回目	9 年 5 月 20 日～5 月 27 日	1, 5, 10
2 回目	9 年 6 月 3 日～6 月 10 日	1, 5, 10
3 回目	9 年 7 月 29 日～8 月 5 日	5, 10, 30
4 回目	9 年 9 月 30 日～10 月 7 日	5, 10, 30
5 回目	10 年 2 月 7 日～2 月 6 日	5, 10, 30

(2) 流速と生産率

各回毎の流速-生産率の実験結果を図-5 に示す。各回の実験では水温の影響を受けているため、図中の生産率は図-3 の関係を用いて補正している。実験では、流速の大小に関わらず、一般的な生産増大期と同様に 2 月が最大で 10 月の約 10 倍の生産率となる。これは流速よりも実施時期 (栄養塩や生態特性) の方が生産率に大きく関与することを示している。また、同時期で流速が生産率に与える影響を比較すると、最大期の 2 月でも 10 cm/s 以上の流速で生産率が一定になる傾向を示した。

(3) 栄養塩濃度と生産率

対象とする栄養塩は、コンブ類の生産に重要な制限要因とされる硝酸態窒素とした (Chapman, 1978)。各期の

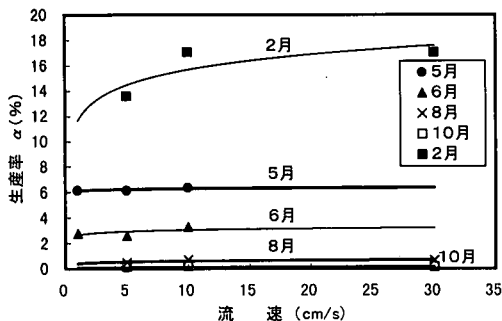


図-5 流速と生産率の関係

表-3 忍路湾の硝酸態窒素濃度 (1980～84 年の平均値)

月	12	1	2	3	4	5
濃度 ($\mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$)	4.8	3.7	3.8	3.2	8.8	2.7
月	6	7	8	9	10	11
濃度 ($\mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$)	0.8	0.5	1.5	0.5	0.7	1.8

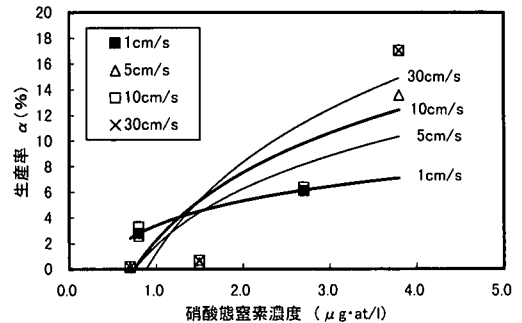


図-6 硝酸態窒素濃度と生産率の関係

栄養塩濃度は、表-3 に示す忍路湾内での 1980～84 年の平均値濃度を用いた。水温で補正した生産率を求め、栄養塩との関係を流速別にまとめた結果を図-6 に示す。栄養塩濃度が高いほど生産率が高い中で、流速が遅いほど栄養塩濃度の影響は少なく、逆に流速が速いほど影響が大きい結果となっている。この結果には、流速と栄養塩の両因子が生産に与える影響を示している。

4. モデルの実海域への適用

(1) 生産量式の構築

実験結果等に基づき、生産量式に水温・流況・栄養塩の影響を生産率として取入れた。このうち水温は図-3、流況・栄養塩は、図-6 の結果を用いた。

1 日当りの生産速度が α (%) 増加すると、翌日の生産速度は $(1+\alpha/100)$ 倍で、増加した分も翌日からの生産に寄与するため、 n 日後の生産速度は $(1+\alpha/100)^n$ となる。この加算される α を図-6 の実験結果から求め、図-7 に示した。

実験で得られた α は茎状部から 30 cm の長さまでの生産率で、この部位はコンブ全体に比べ生産が活発な場所である。ホソメコンブの部位別成長を調べた阿部ら (1983) の報告を参考に、全長の成長は茎部から 30 cm までの 0.340 倍という結果を得て、全長での生産率を 0.340α とした。

(2) 生産量式の再現性

これらの生産率を取入れた群落の生産量と、表-1 に示す調査・実験で得た係数を用いた生産量を比較・検証した。表-1 の係数の a , b は生物用酸素モニターを用い

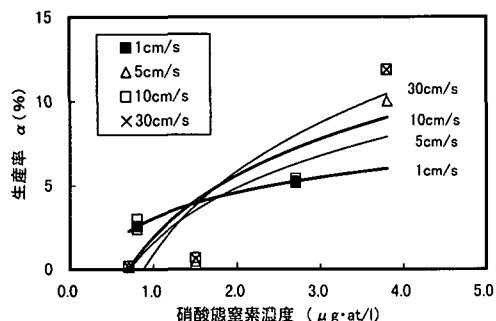


図-7 加算を考慮した生産率

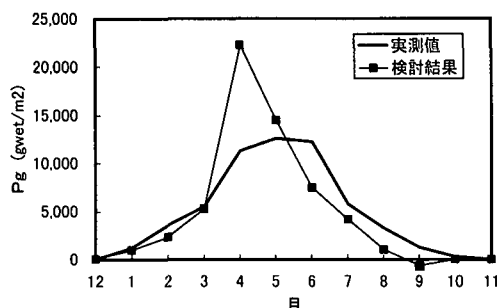


図-8 計算結果と実測値の比較

た室内実験値で、それ以外は現地フィールドで得られた値である。実験では試料を試験管内で回転させており、流速は回転数等から 30 cm/s と想定した。結果を図-8 に示すが、最大月及び最大生産量に相違はあるものの、春季の急激な生産量の増大や夏以降の減少傾向はほぼ再現しており、また年間の総生産量はほぼ同等な値である。これらより、生産量式に水温や流速・栄養塩を変数として扱うことの妥当性を示した。

5. 平面モデルへの適応

再現性を確認した生産量式を用い、平面モデルへの適応性を検証した。モデル海域とした忍路湾は、北海道小樽市西方にある日本海に面し、図-9 示す湾口約 300 m、奥行約 800 m のグロブ状をなす湾である。湾内は比較的静穏で、ホソメコンブ群落が形成されている。

(1) 藻場分布調査

モデルの現況再現性を確認するため、忍路湾内にて藻場分布調査を行なった。調査は湾内 6 地点において、夏(平成 9 年 8 月)と冬(平成 10 年 1 月)の計 2 回、ライントランセクト調査を行ない海藻被度やキタムラサキウニの分布調査を行なった。

(2) 藻場分布調査結果

忍路湾内の海藻類の被度は、キタムラサキウニの捕食による影響で、水深 3 m 以深での繁茂は見られず、海藻

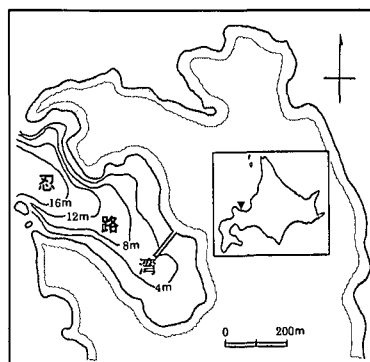


図-9 対象海域(忍路湾)の形状

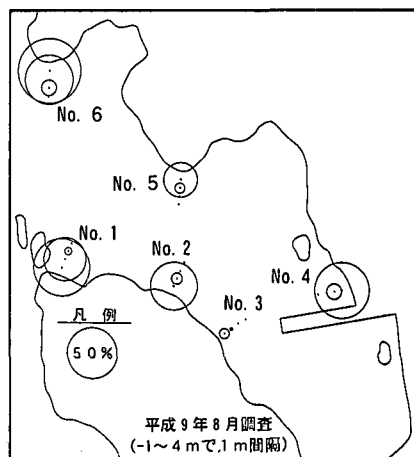


図-10 調査地点別の海藻被度分布図

の境界までウニが分布していた。ウニは湾口部の No. 1, 2 で相対的に少なく、逆に海藻被度が高くなっていた。調査地点と、代表的な例として 8 月の海藻被度分布図を図-10 に示す。

(3) 計算手法

生産量式中的変数のうち、光強度は緯度・水深・海水の透明度 (14.5 m) で与えた。生産量式には水温、流速と栄養塩濃度による生産率を考慮するが、水温は船野 (1983) による 1948~67 年の湾内の平均値、栄養塩(硝酸態窒素)濃度は 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。

(4) 計算条件

波浪出現頻度は開発局資料 (1994) を参考に、近隣で地形特性が近似している石狩湾新港でのエネルギー平均波を用いた。各月の波浪緒元、水温・栄養塩条件を表-4 に示す。なお、計算格子間隔は 15 m とした。

表-4 計算に用いた環境条件

月	波 浪 緒 元			水 温 (°C)	硝酸態窒素 ($\mu\text{g}\cdot\text{at}/\text{l}$)
	卓越波向	H (m)	T (s)		
12	NW	0.82	5.0	7.7	4.8
1		0.85		5.6	3.7
2		0.75		5.3	3.8
3	SW	0.56		5.2	3.2
4		0.29		7.3	8.8
5		0.27		11.3	2.7
6	SW	0.13		16.1	0.8
7		0.08		19.4	0.5
8		0.12		21.9	1.5
9	SW	0.30		20.6	0.5
10		0.60		16.1	0.7
11		0.82		11.3	1.8

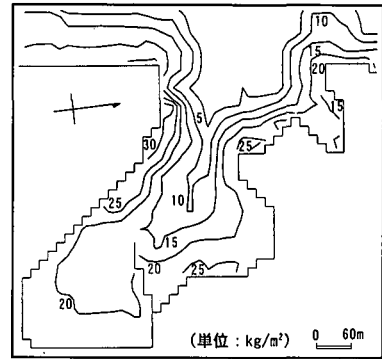


図-11 湾内の累計生産量計算結果 (8月)

(5) 計算結果

生産量の平面分布計算結果のうち、代表的な例として8月までの累計生産量を図-11に示す。生産量が多いのは湾口で、これは波浪により湾口部の流速が大きく生産量が増大することの現れで、現存分布量の傾向と一致する。一方、湾奥部は絶対量で湾口部より少ないが、比較的生産量が多い。これは流速は小さいものの水深が浅く、光強度の減衰が少ないためと考えられる。

水深が深くなるにつれ、生産量は光強度の低下により緩やかに減少するが、実際にはキタムラサキウニの捕食により水深3m以下で現存量は皆無である。従って、ウニの捕食圧を考慮していない現状のモデルを忍路湾で適応するには、水深3m程度が限界と考えられる。

また道中央水試が報告した航空写真を用いた分布調査結果(1997)では、湾の1m以浅は平坦な棚状をなし、そこでの生産量が非常に高いとしている。その要因は、水深が浅く流れが常に生じ易く生産を促進すること、流れのある場ではキタムラサキウニの捕食圧が低減すること、急傾斜な場所よりも単位面積当りの受光強度が強いこと、等の現象が重なり合うためと考えられる。

これらのことから、今後この平面モデルは、基質の形状を生産量に反映させること、ウニの捕食を考慮することにより精度の向上が図られる。

6. おわりに

北海道西海岸の代表種であるホソメコンブについて、海域環境を変数とする生産量式を構築した。構築に当たっては、現地実験により流速と栄養塩が生産に与える影響を明らかにした。この結果並びに既往の知見を用い、生産量式で水温や流速・栄養塩の生産率を考慮すると、実

際の生産量変動傾向と一致することを確認した。

平面での適応性を検討するため、忍路湾の分布を事例とした平面計算を行なった。その結果、地形の影響や波浪による影響で生産量が変化し、分布はほぼ現状と一致することを示した。今後はウニの摂餌圧や傾斜等の海底形状の考慮が必要である。

なお、現地実験にあたり多大なる便宜をいただいた北海道大学忍路臨海実験場の信太郎氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 阿部英治・垣内政宏・松山恵二・金子 孝 (1983): 忍路湾のホソメコンブの生長と各種体内成分含有量の季節変化, 北水試報告, 第25号, pp. 47-60.
- 新原義昭 (1975): リシリコンブの生理学的研究, 北水試報告, 第17号, pp. 11-17.
- 桑原伸司・松山恵二・北原繁志・大塚夏彦・谷野賢二 (1997): 藻類の成長に影響する環境要因の研究, 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 285-290.
- 農林水産技術会議 (1997): 磯焼けの発生機構の解明と予測技術の開発, pp. 6-15.
- 船野 隆 (1983): ホソメコンブの生態第1報生活史と核相交番及び配偶体と幼胚体の生理特性, 北水試報告, 第25号, pp. 61-109.
- 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).
- Chapman, A. R. O (1978): Effect on Nitrate Concentration on the Growth and Physiology of Laminaria Saccharina (Phaeophyta) in Culture, J. Phycol., No. 14, pp. 195-198.
- Monsi, M. & T. Saeki (1953): Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Jap. Jour. Bot., 14, pp. 22-52.