

## 藻類の成長に影響する環境要因の研究

## Study on environmental factors that influenced algae growth

桑原伸司\* 松山恵二\*\* 北原繁志\*\*\* 大塚夏彦\* 谷野賢二\*\*\*\*

Shinji Kuwabara, Keiji Matsuyama, Shigeji Kitahara, Natsuhiko Ohtsuka, Kenji Yano

In recently, we realize that the problem of marine resources and environment has been engaged actively. In Marine Civil Engineering, new technology for the "algae reproducing structures" which enable marine life reproduction is under developing. In the process of this technology developing, we are now researching the numerical model which forecasts algae growth under the variable environmental and structures location factors in the ocean. This numerical model definitively needs the quantification of the algae reproduction and environmental factors. In this study, we analyze the data to clarify the relation between algae growth and trailing factors which has been our marine purpose on this field but never been clarified.

Keywords : Algae growth, Environmental factors, Numerical model

## 1. はじめに

近年の自然環境に対する国民意識の変化、国連海洋法条約の批准等を背景に、海洋土木の分野では海洋資源・海洋環境に対する積極的な取り組みが求められている。この中でも特に、新形式の港湾漁港構造物として、水産動植物の生息、繁殖が可能となる藻場造成に配慮した構造物の技術開発及び配置検討が積極的に行われてきている。今後これらの検討においては、藻場の特性を踏まえ、海洋の諸環境や港湾漁港構造物の配置を条件として藻類の成長を予測する数値モデルの開発が不可欠になると予想される。

筆者らは現在、海域環境の変化から藻場群落の生産量を工学的に予測する3次元モデルを開発中であり、このモデルでは藻場生産量と環境要因の定量化が最も重要な課題となっている。本研究では、各種パラメータと藻類の生産量との関係より明らかにし、現地データを用いてモデルの構築に必要となる新たな生産量式を検討したものである。

## 2. 開発を進めている3次元モデルの概要

港湾漁港構造物の整備による環境への影響は従前から懸念されており、近年においては海域生態に関する事前・追跡調査が数多く実施されるようになってきた。これらのデータを数多く分析した結果、一般的にいわれている港湾漁港構造物の整備による藻場の直接的な消滅がある一方で、構造物周辺での藻場・漁場の発生などの効果も得られていることが明らかになってきた。これら周辺の生態環境（特に多くの機能を有する藻場）の変化を事前に予測評価することは、今後の施設配置及び構造の検討に大いに有効な手段となるものと考えたのが、3次元モデル開発の動機である。

開発にあたって、想定した基本コンセプトは、次の4点である。①構造物の配置、地形変化等による影響に着目し、計算範囲は10km×10km程度のスケールで予測する、②藻類個々の状態（生息本数・個体重量・品質）に着目するのではなく、計算領域内での生産期待量を予測する、③予測期間は1年間程度とする、④構造物配置により変化する波浪・流況・水質等を取扱う。

## 3. 藻類の成長に関係する環境要因

藻類の生産量予測を行なうためには、藻類の成長を左右する環境要因（パラメータ）を把握し、生産量算定式にこれらを取込む必要がある。また、3次元計算モデルにおいても、これら環境要因を予測することが必要となってくる。そこで環境要因を物理的・化学的等に分類し、既往の知見をもとに影響の程度を検討した。

## 3. 1 物理的要因

1) 波浪・流況：種苗の供給・着生、藻体の摩耗・剥離、海水交換・栄養塩の供給に係る要因である。一般的に波高が高く流れが早い箇所では遊走子の着生率は低いが、着生後の適度な海水流動は藻類の成長に好影響

\* 正会員 北日本港湾コンサルタント（〒003 札幌市白石区平和通2丁目北1-1-8）

\*\* 北海道水産部漁政課

\*\*\* 正会員 北海道開発局開発土木研究所水産土木研究室

\*\*\*\* 正会員 北海道東海大学工学部海洋開発工学科

を与えるといわれている。

2) 漂 砂：藻類の摩耗・埋没、光量の増減に関係する要因である。砂泥域では遊走子の着生を困難にし、また荒天時の海底砂の舞上がりは海底に到達する光量を減少させ、藻類の光合成量に影響を与える。

3) 水 深：ホンダワラ類を中心としたガラモ場は潮間帯下部から水深15m、海中林ではコンブ・アラメ・カジメ類が潮間帯下部から水深25mまでに生育する。

4) 着生基質：基質の違いにより遊走子の着生に差がみられる。一般的には、波浪によって動揺するような転石には大型藻類が着生しにくいこと、表面の粗い石に発芽が多いことが知られている。また、流れのある箇所に円盤状の試料台を置き着生量を調べたところ、正面壁、円盤の縁、背面壁の順に多く、円盤面上での着生が一番少ないとの報告がある。

5) 水 温：筆者である松山の研究によると、季節によりホソメコンブの水温－光合成量の関係は変化するが、概ね5～22℃で成長し、最大成長となるのは15～20℃の範囲であった。

6) 光 量：光強度(I)－光合成量(P)の関係をみると、光強度の初期増加に伴い光合成量は急激に増加するが、その後光補償点で漸近してしまう傾向にある。I－P曲線は季節により異なり、ホソメコンブでみると成長の大きい時期には勾配が緩く、逆に成長の少ない時期には勾配がきつい傾向がある。

### 3. 2 化学的要因

1) 懸濁物質：光量、種苗の沈降に影響を与える。懸濁粒子が多くなると、遊走子に懸濁粒子が吸着し着生能力が減少する。また、懸濁粒子が着底基質へ付着し着生が阻害されてしまう。カジメ・ワカメの遊走子の場合、懸濁物質の濃度が20mg/lの場合で着生数の減少は、ろ過海水の場合の75%にも達すると報告されている。

2) pH：ワカメ幼葉帯の光合成は、24時間後でpH9.3以上、72時間後でpH8.9以上で著しく阻害されると報告されている。

3) 塩 分：筆者である松山の研究によると、ホソメコンブの光合成速度と塩分濃度の関係は、10～15以下で阻害を受けるとされている。

4) 栄養塩類：硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、リンなどの栄養塩類濃度が藻類の成長に影響を与える。

### 3. 3 生物的要因

1) 阻害生物：藻類の成長を阻害する食藻生物として魚類及び旬動物などがあるが、北海道の日本海沿岸ではキタムラサキウニによる食害が磯焼けの一因といわれている。また、競合生物としては、カンザシ類、ホヤ類、石灰藻などがあげられる。

### 3. 4 対象藻類の特性

北海道日本海沿岸では磯焼けによる水産資源の減少が問題となっている。また、この海域は比較的岩礁域が多く藻類に関する既往データが豊富である。そこで、予測モデルの対象藻類は、この海域の代表的な藻類の一つであるホソメコンブ (*Laminaria religiosa* Miyabe) 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し、コンブ漁業、ウニ・アワビ類の餌料海藻、生息場所として重要な1年生海藻である。胞子体は12～3月にかけて出現し、高さ60cm～2m、幅6～10cm、茎の長さ約5cmまで成長する。中帯部は葉状部の幅の1/3以上に達し、深所に生育するものは比較的幅が広がる。分布域は低潮線付近から漸深帯で、岩上に群落をつくって生育する。

## 4. 生産量算定の基本式

### 4. 1 影響要因の選定と計算フロー

上記の要因分析及びホソメコンブの特性をもとに、ホソメコンブの生産量算定式に取込む環境要因を選定した。選定は、藻類の成長に大きな影響を与える項目、または数値解析で取扱える項目とした。そこで、要因の中から化学的要因であるpHと塩分を除外し、残りの波浪・流況、漂砂、水深、懸濁物質、着生基質、水温、光量、阻害生物 (キタムラサキウニ) を選定した。pHを除外した理由は、北海道西部の日本海沿岸では、生息を大きく阻害する値にはほとんどならないためである。また塩分は、河川水の影響で表層が低濃度になる海域はあるものの、その濃度及びホソメコンブの生息水深を考慮して除外した。

### 4. 2 生産量算定の基本式

Monsi & Saeki (1953) は、光合成－光曲線と群落の葉量と入射光の光強度から、植物群落の総生産力を推定可能な次のような数学モデルを確立した。

$$Pg = \frac{b}{Ka} \ln \frac{1 + aKI_0}{1 + aKI_0 \exp(-KF)} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Pg：群落の日単位総光合成速度 (g wet wt./m<sup>2</sup>/day)、a：b/aは光飽和値での光合成量 (P<sub>0.01</sub>)、b：光

合成—光曲線の立上り勾配,  $K$ : 群落吸光係数,  $I_0$ : 群落の葉層上面の水平光強度,  $F$ : 葉層全体の葉面積指数 ( $m^2/m^2$ )

松山 (未発表) は、北海道忍路湾で行なったホソメコンブの現地調査・実験結果から得た、個体の呼吸量・総光合成速度、群落の葉面積指数と光環境、群落の受ける光情報等、を考慮して (1) 式を改良した。

個体の総光合成速度 ( $p$ ) と受光強度 ( $I$ ) との関係は (2) 式で与えられる。

$$p = \frac{bI}{1 + aI} \dots\dots\dots (2)$$

群落内のある深さにおける総体光強度 ( $I$ ) と、葉層上面からその深さまでの積算葉面積指数  $F'$  の関係は、葉状体部の光の透過率 ( $m$ ) を用いて次式で表せる。

$$I = \frac{K I_0 \exp(-KF')}{1 - m} \dots\dots\dots (3)$$

一方、群落の受ける 1 日の光強度は次式で表せる。

$$I_0 = I_M \sin^2(\pi / D)t \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $I_M$ : 日南中時の光強度 ( $\mu E/m^2/sec$ ),  $D$ : 日長 (hr),  $t$ : 日の出からの経過時間 (hr)

(3) 式と (4) 式を (2) 式に代入し、変数  $F'$  について葉層上面 ( $F'=0$ ) から  $F'=F$  まで積分すると  $P_g$  は以下のようになる。

$$P_g = \int_0^F \frac{bK I_M \exp(-KF) \sin^2(\pi / D)t}{(1 - m) + K a I_M (-KF) \sin^2(\pi / D)t} dF' = \frac{b}{K a} \ln \frac{(1 - m) + K a I_M \sin^2(\pi / D)t}{(1 - m) + K a I_M \exp(-KF) \sin^2(\pi / D)t} \dots\dots\dots (5)$$

さらに、時間積分を行なうと次式が得られる。

$$P_g = \int_0^D \frac{b}{K a} \ln \frac{(1 - m) + K a I_M \sin^2(\pi / D)t}{(1 - m) + K a I_M \exp(-KF) \sin^2(\pi / D)t} dt = \frac{2Db}{K a} \ln \frac{1 + (1 + \{K / (1 - m)\} a I_M)^{1/2}}{1 + (1 + \{K / (1 - m)\} a I_M \exp(-KF))^{1/2}} \dots\dots\dots (6)$$

この式から群落の光合成系である葉状態呼吸量 ( $R_f$ ) を差し引くと剰余生産量 ( $P_s$ ) が求まり ( $P_s = P_g - R_f$ )、さらに群落の非光合成系である茎状部と付着基部の呼吸量 ( $R_c$ ) を差し引くと純生産量 ( $P_n$ ) が求められる。なお、実験を行なった忍路湾での  $P_n/P_g$  比は、年間を通じ 0.55 程度であった。

$$P_n = P_s - R_c = P_g - (R_f + R_c) \dots\dots\dots (7)$$

以上より、本検討においては、(6) 式を生産量算定の基本式として扱うことにした。

4. 3 3次元モデルで用いる生産量算定式の導入

(6) 式には  $a, b, K, F$  等の各種の生態特性を表す係数が含まれている。これらの係数には、物理条件を含む海域環境の様々な状況を示す情報が含まれており、これらのデータ (年間の経過が判る月別程度) が対象とする海域に存在するならば、生産量の計算は非常に容易である。しかし、多くの海域ではデータの蓄積がなく、また蓄積されるほどのデータがあれば、あえて予測する必要はない。3次元モデルは、多くの海域での適用を考え、最小限のデータで藻場環境を予測することを目的に開発している。そこで、生態特性を表す係数を決定する要因は、物理環境を中心とした海域環境の変化にあると考え、生産量式の生態に関する係数を変数としては扱わず、環境条件の予測で生産量を算定することに努めた。具体的には、 $a, b, K, F, m$  を一定値として与えることとした。そこで、(6) 式中で用いているその他の変数、及び周辺環境が生産を制限する程度を以下のように設定した。

1) 光強度: 光強度は、①海面の光強度、②水中の光強度、に分け算定した。日別 (day) の海面光強度は、地域によって決定する  $A, B, \alpha$  を用いて、 $I_0 = A + B \times \cos(2\pi(\text{day} + \alpha)/365)$  という関数形で算定することとした。水中の光強度 (減衰) は、 $I_M = I_0 \exp(-sh)$  とした。ここで、 $h$  は水深、 $s$  は海中の吸光係数である。 $s$  は透明度 ( $D_s$ ) または SS 濃度から算出でき、 $s = 1.7/D_s$ ,  $s = 0.31 \times (SS) 1.046$  である。このモデルは海中の SS 濃度が低い岩礁海域に限らず、砂浜に岩礁が分布する海域にも適用を考えているため、 $D_s$  と SS の算出結果をそれぞれ乗じて  $I_M$  とした。

2) 水 温: 日別 (day) の水温は、光強度と同様に、 $\text{Temp} = A + B \times \cos(2\pi(\text{day} + \alpha)/365)$  という関数形で算定することとした。水温 ( $t$ ) による生産量の補正は、Eppley (1972) の示した、 $\log \mu = 0.0275t - 0.070$  を用いた。ここで、 $\mu$  は最大成長可能率である。

3) 栄養塩: Monod (1942) による栄養塩濃度と植物プランクトンの成長の関係を用いて補正した。補正係数 ( $\gamma$ ) は、次式で算定した。

$$\gamma = \frac{G}{G_{\max}} = \frac{N}{K_s + N} \quad \text{ここで、} G, G_{\max}: \text{成長速度、} N: \text{栄養塩濃度、} K_s: \text{半飽和定数}$$

4) a, b 及び m : a, b 対象種によって、b は海象によって決定される係数である。忍路湾で得られたホソメコンブのデータでは、 $a = 0.0196 \sim 0.1046$ 、 $b = 0.1220 \sim 0.4040$ 、 $m = 0.07 \sim 0.30$ であった。本検討では、その期間の平均値として、 $a = 0.0537$ 、 $b = 0.2542$ 、 $m = 0.19$ を用いた。

5) K 及び F : 成長が進につれ藻類が繁茂してくると、自身の繁茂の影響で群落内で光阻害がおこる。この光阻害を表す係数が K 及び F である。両者は生産量に依存すると考えられ、 $F, K = f(P_g)$  の関数系で表されるものと考えた。そこで、次章に示す現地データとの比較において、ホソメコンブの F, K を推定する方法を検討した。

### 5. 現地データと生産量式の応答解析

#### 5. 1 現地データの概要

計算結果と比較する現地データは、北海道小樽市西方で日本海に面する忍路湾のものとした。忍路湾は湾口が狭く奥行きが深いため、湾内は比較的静穏で 0.5~1.0 m の水深にホソメコンブの非常に優勢な群落が形成されている。筆者の一人である松山は、1981 年 12 月~1982 年 11 月に図-1 に示す群落において、ホソメコンブの光合成に関する各種の実験調査を行なった。表-1 に示す調査結果を用いて、生産量式の再現性を確認することとした。

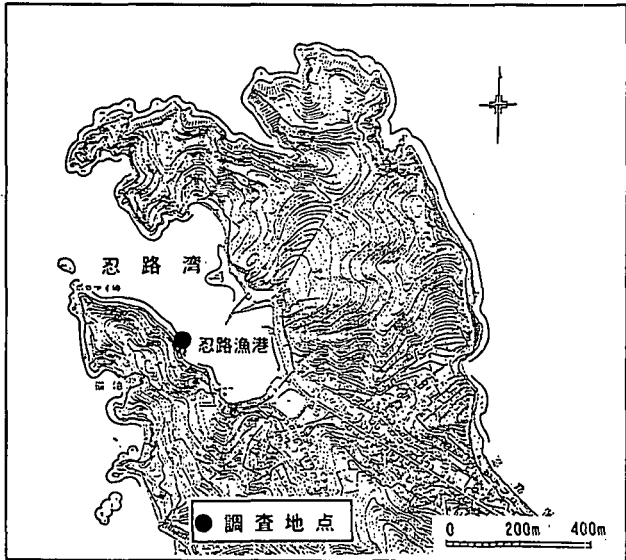


図-1 調査位置図

表-1 忍路湾内群落での調査結果

| 係数 | Dec    | Jan    | Feb    | Mar    | Apr    | May    |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 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     |
| IM | 365    | 400    | 518    | 757    | 948    | 785    |
| r  | 10.13  | 15.50  | 18.91  | 16.92  | 18.96  | 18.14  |
| 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   |
| Ps | 0.3    | 19.9   | 78.1   | 139.1  | 245.5  | 256.3  |
| 係数 | Jun    | Jul    | Aug    | Sep    | Oct    | Nov    |
| 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      |
| IM | 912    | 1125   | 895    | 973    | 890    | 417    |
| r  | 15.50  | 18.03  | 21.43  | 31.53  | 26.35  | 19.00  |
| 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   |
| Ps | 214.2  | 56.9   | 37.7   | -3.2   | 0.1    | -0.2   |

#### 5. 2 生産量式の応答解析

##### 1) 光強度の成長阻害 (SS と透明度)

SS 濃度と透明度が群落上層の光強度を減少させると考えられ、その程度を生産量式により検証した。そこで、表-1 に示した実測パラメータのうち  $I_0$  のみを補正した。透明度を 10m として補正した結果を図-2 に、SS 濃度を 2mg/l として補正した結果を図-3 に示した。図中にある現地データとは、表-1 のパラメータ全てを用いた結果である。それによると、この生産量式では、僅か 2mg/l の SS 濃度でも成長に大きな影響を与えることが示された。

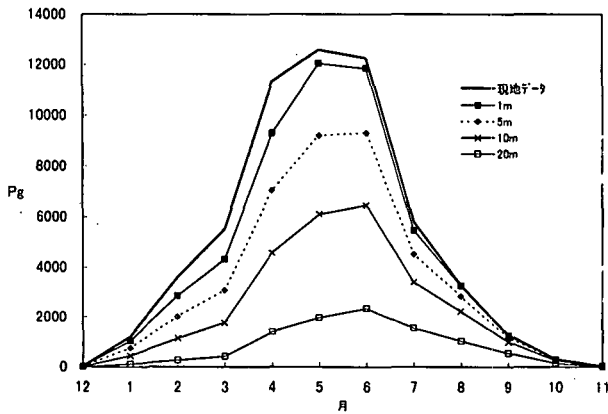


図-2 透明度による補正結果

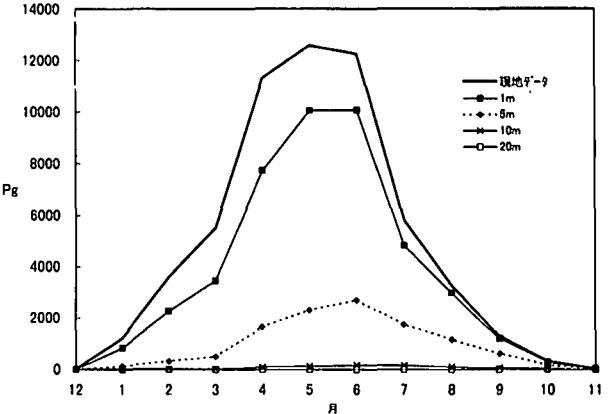


図-3 SS濃度による補正結果

## 2) 水温による補正

生産量式の応答を検討するため、表-1に示したパラメータのうち藻の生産により決定されるF, K以外を年間平均値とした場合をCASE-1、さらに水温補正を行なった結果をCASE-2として図-4に示す。その結果は2, 3月の成長立上り勾配が緩い結果となった。この勾配の緩さは、別途行なった要因解析よりパラメータaに依存していることが示された。そこで、aは受光強度に関係していることからCASE-2のうち受光強度のみを表-1とした場合をCASE-3として同図に示したが、大きな変化は認められなかった。これはaが比較的低光量下の光合成速度に影響を受けていると考えられる。

次に流れの強い海域での成長が大きいとの調査結果をもとに、栄養塩フラックスに着目して簡便的な補正を行なうこととした。補正の方法は、フラックスを引起こす要因は波浪と考え、(栄養塩濃度) × (波高)を栄養塩フラックスとし、4. 3. 3)で示した栄養塩式により補正した。また、栄養塩フラックスは栄養塩濃度よりも流れが支配的と仮定し、栄養塩濃度は一定値とした。なお、ここでの(波高)とは、月別の波高の大小を表す無次元量(月別比)である。図-5では、フラックスにより補正した結果をCASE-5に、図-4で示した水温補正結果をCASE-4として、また水温と栄養塩フラックスの両方で補正した結果をCASE-6として示した。それによると、CASE-4に比べCASE-5, 6とも成長の立上り勾配の再現性は向上するが、成長量最大値では再現性が悪化している。

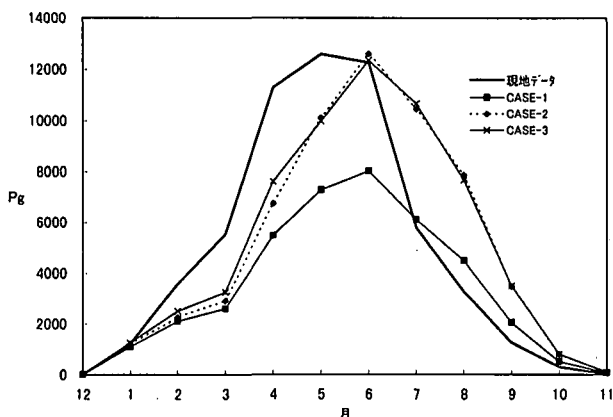


図-4 水温による補正結果

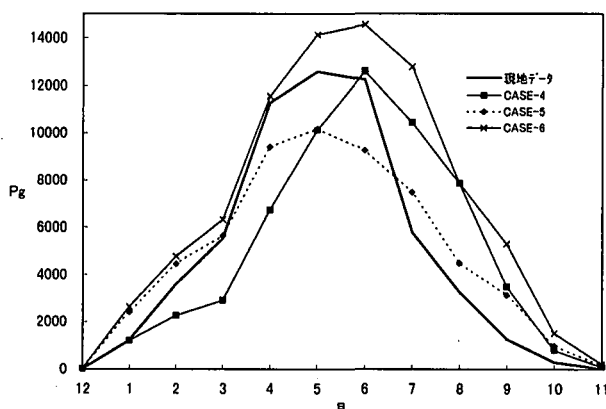


図-5 栄養塩による補正結果

## 5. 3 吸光係数・葉面積指数の推定

CASE-6において、生産量の立上り勾配の再現性は向上してくるものの、最大値が大きい結果となっている。この原因は成長に伴い繁茂し変化する係数K, Fにあるものと推定し、またK, Fの実測値を現地データで補うことは通常の海域では難しいと考え、推算する式を想定した。表-1の現地データより、K, Fはそれらの持つ生態的意味合いから成長量の関数になっているものと考え、各種検証の結果前月までの $\Sigma Pg$ に依存していることを示した。その結果は図-6, 7に示すもので、相関係数の比較的高い関係が得られた。

この結果を先に示した水温補正・栄養塩補正に加え生産量式に反映させた結果が、図-8である。ここでCASE-7は平成9年に別途実施した群落内の光の減衰調査結果をもとに、5月以降群落内の光強度が3割減少するものとした。これらの条件に、Fを直線で近似した結果がCASE-8、Fを指数関数で近似した結果がCASE-9、Fを指数・Kを直線で近似した結果がCASE-10である。これより、CASE-9, 10では最大月までの増加傾向は再現しており、そこまでのK, Fの算定が妥当であることを示した。

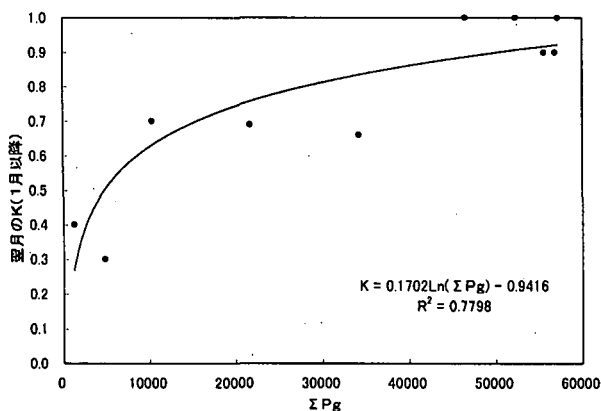


図-6 Kと $\Sigma Pg$ の相関

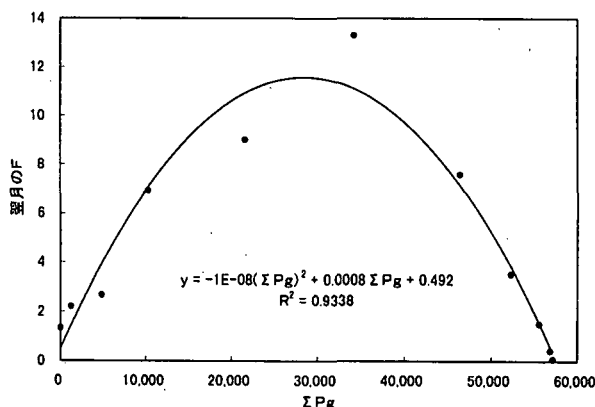


図-7 Fと $\Sigma Pg$ の相関

## 5. 4 新たなパラメータの推定

### 1) たなびきによる補正

最大月以降の不整合となる時期の日本海側の海象は、比較的静穏で波浪による影響を受けない時期である。これは生長に大きな影響を与える光量が繁茂に加え、静穏により影響を受けているものと想定し、たなびきによる受光面積の減少をその原因と考えた。そこで、同海域に隣接し、波浪の出現頻度が類似する石狩湾新港推算値を用いて補正した。補正は、高山法による回折計算を行なった結果で対象箇所の高さを推定したものである。その後、波浪の大小によりたなびきの程度を求め、光強度を推定した。その結果を図-9に示すが8月以降の不整合が依然残るものであった。

### 2) 栄養塩フラックスによる補正

上記までの不整合は、栄養塩濃度を一定値にしたことに大きく関係しているものと判断し、月別の栄養塩データを用いた栄養塩フラックス補正を試みた。データは1984~1987年に宗谷海峡で観測された硝酸態窒素の月別変化を用いた。このデータでは1月の6.8~8月の0.4  $\mu\text{gal/l}$ まで変化していた。また、 $K_s$ はEppley et al. (1969)の文献値の平均より2.1として補正した。その結果は、図-10に示すとおりで、最大値は小さめに見積もるものの、懸念であった最大月以降の不整合が解消され、時間経過による成長変化を概ね再現した。これは、生産量には栄養塩フラックスが日射量とともに大きく関与しているものと考えられる。一方9月以降の不整合には、環境以外の要因(生態的な吸収力減少、先枯れ、 $K_s$ の見積もり、等)も考えられ、今後の調査・試験により明らかにする予定である。

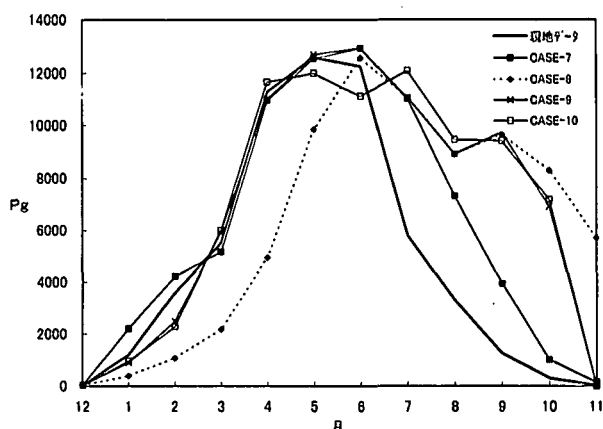


図-8 KとF補正による算定結果

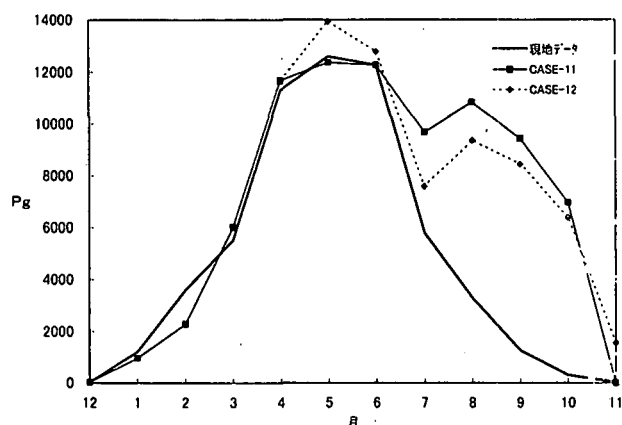


図-9 たなびきによる補正結果

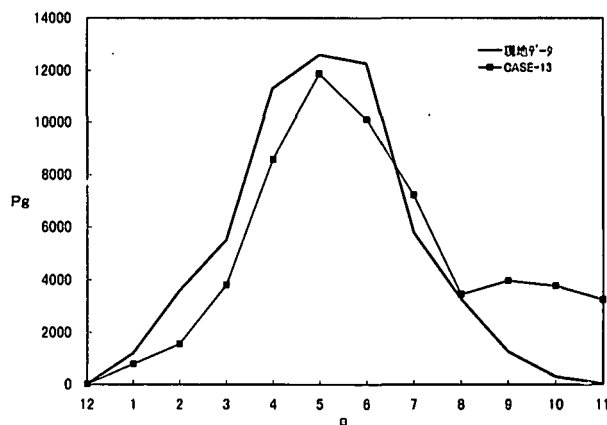


図-10 栄養塩による補正結果

## 6. まとめ

生長量産定式に関する各種の要因分析を行なった。その結果、光強度を制限する透明度・SS・たなびき、栄養塩と流れの関係を示す栄養塩フラックスが成長に大きく関与していることを明らかにした。今後は各パラメータについての調査・試験を行ない再現性の向上及び他の海域での適応を可能にするとともに、この生産量式を用いた3次元モデルでの検証を行なう予定である。

## 参考文献

- 松山恵二(1985): ホソメコンブの生産量推定における光合成速度の季節変化, 北海道水産試験場報告, Vol. 27, pp. 91-99
- 松山恵二(1987): ホソメコンブの物質生産, 東京大学海洋研究所 大槌臨海研究センター報告第13号, pp. 59-61
- 松山恵二(未発表): 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
- 秋山 他(1986): 藻類の生態(内田老鶴圃)
- 大規模砂泥域における藻場造成技術の開発 技術資料: (社)MF21大規模砂泥域開発研究会(平成3年3月)
- Job Baretta 他著、中田喜三郎監訳(1995): 干潟の生態モデル(生物研究社)