

# 熊本沿岸海域における秋季の*Skeletonema costatum* 増殖環境特性とHSIモデルの適用

## THE APPLICATION OF HSI-MODEL AND GROWTH ENVIRONMENTAL CHARACTERISTIC OF *Skeletonema costatum* IN THE AUTUMN IN COASTAL AREA OF KUMAMOTO PREFECTURE

齋藤孝<sup>1</sup>・滝川清<sup>2</sup>・櫻田清成<sup>3</sup>・増田龍哉<sup>4</sup>

Takashi SAITHO, Kiyoshi TAKIKAWA, Kiyonari SAKURADA and Tatsuya MASUDA

<sup>1</sup>学生会員 熊本大学自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>2</sup>フェロー 工博 熊本大学沿岸域環境科学教育研究センター教授 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>3</sup>熊本県水産研究センター (〒869-3603 熊本県上天草市大矢野町中字瀬の内2450-2)

<sup>4</sup>正会員 工博 熊本大学特任助教 大学院先端機構 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

The possibility of predicting red tide occurrences by including the causes of growth of *Skeletonema costatum* during the autumn into the HSI model was considered. The possibility that the amount of rainfall, duration of sunlight, amount of solar radiation, maximum daily wind speed, tidal variation and competing diatom density may influence the growth of this species was found. The minimum function was selected for the integration of the SI model of each growth factor, and HSI values were calculated. Cell density during large scale proliferation, including non- growth cases of this species, nearly matched the model. From now, verification of this improved HSI model to predict the occurrence of red tide in other marine areas is needed.

**Key Words :** *Skeletonema costatum*, Red tide prediction, HSI-Model, Coastal area of Kumamoto

### 1. はじめに

有明海において2000年のノリ漁期中に発生した珪藻赤潮は大規模かつ長期間継続し、養殖ノリに甚大な色落ち被害をもたらした。それ以降も珪藻 *Skeletonema costatum* を原因種とする赤潮が特に熊本県沿岸海域では多発傾向にある<sup>1)</sup>。こうした赤潮問題への取り組みとして、被害防止・軽減の観点から赤潮発生予測に関する技術開発が重要視されている。現在、あらゆる海域に適用できる赤潮予測技術は開発されていないが、本研究では *S. costatum* 増殖環境条件の特性を増殖時と非増殖時において整理することで、本種増殖に影響を与える環境要素を抽出できるのではないかと考えた。抽出要素については、従来の予測手法である重回帰分析を行いその問題点を考慮に入れた気象、海況及び生物的要素から成る HSIモデルを構築し本種増殖過程の再現を試みた。

### 2. 調査概要と本種の出現状況

熊本県水産研究センターは、熊本沿岸海域において

図-1に示す3測点3層で赤潮発生状況の把握及び予測手法の開発を目的とした調査を、ノリ養殖期間中2週間に1回の頻度で行っている。測定分析項目は水温、塩分、pH、DO、栄養塩類、植物プランクトン、クロロフィルaである。本研究では2002～2007年までの調査データを使用し、特に *S. costatum* の大増殖が顕著だった St. 2での9～11月のデータについて重点的に解析した。



図-1 調査測点位置図

### (1) 植物プランクトンの出現状況

全60回の調査では、珪藻類が24属24種、渦鞭毛藻類が15属32種、ラフィド藻類が3属5種出現したが、細胞密度が1mL中1,000細胞を超えるまで増殖した種は珪藻 *S.costatum*, *Chaetoceros sociale*, *C.debile*, *Asterionella glacialis*, *Thalassionema nitzschioides*, 渦鞭毛藻 *Prorocentrum dentatum* の6種だけであった。このうち、*S. costatum* は9~11月にかけてしばしば大增殖し、本種の最高細胞密度は2006年10月で St. 2 の0m層の24,600cells/mL となっている。

### (2) *Skeletonema costatum* の水平・鉛直分布

大增殖した *S.costatum* の平均細胞密度を図-2に示す。本種は横島海岸に面する St. 2 に濃密に分布し、他の2測点に比べ3倍から7倍となっている。また、St. 2 では鉛直的に5m層とB+1m層の細胞密度は0m層の約1/3までしか増殖していない。

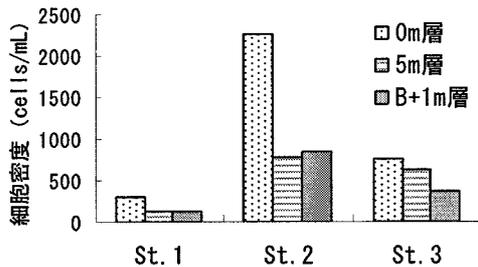


図-2 *Skeletonema costatum* の平均細胞密度

## 3. 増殖海域の環境特性

### (1) 気象・海象

図-3に、各調査年の8~11月における熊本地方気象台観測の日降雨量、日照時間、日最大風速の推移を示す。日降水量は調査開始前の8月をみると年変動が大きく、*S.costatum* が最高細胞密度に至った2006年は5年間で最高の172.5mmを記録した。日照時間も同年で10月は10時間以上の日が多く月平均7.9

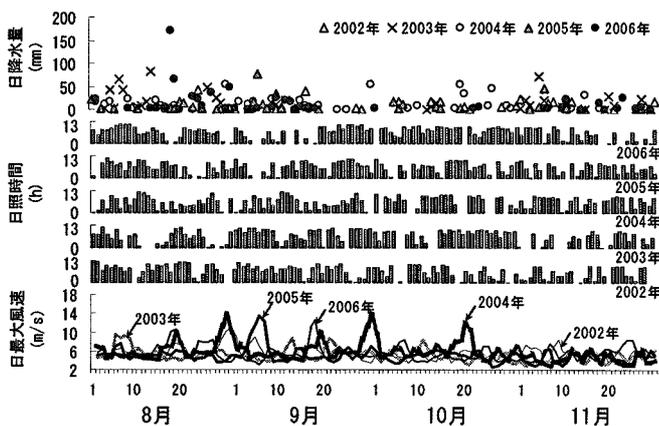


図-3 気象3要素の日変動

時間は全体で最大となった。

また、日最大風速は *S.costatum* の細胞密度が低レベルとなった2004年は、他の年に比べて10m/s以上の強風日が多く発生している。これらはいずれも台風の影響によるものであり、台風の接近から上陸前後の熊本沿岸海域は猛烈な時化で海水の激しい擾乱が起こっていたとみられる。

### (2) 水質

各調査年の9~11月で St. 2 における *S.costatum* 増殖前後の水質変化を図-4に示す。

#### a) 透明度

2004年は5m近くまで上昇する日があるが、当年を除くと大增殖に関らず2~3mの変動で推移した。

#### b) 水温

各層の水温は16.3~28.8°Cの範囲で、9月調査でも鉛直較差はわずかであった。*S.costatum* が最高細胞密度に至った2006年10月31日の水温は0m層で21.8°Cであった。

#### c) 塩分

表層塩分は27.18~32.06PSUの範囲であったが、*S.costatum* の大增殖時(10,000cells/mL以上)の塩分は27.91~29.80PSUとなっており、高塩分時である場合よりも出水の影響による比較的低い方の塩分状態で増殖に至る傾向が示された。

#### d) pH

最高値は2003年10月21日調査時で0m層の8.7であったが、このときは *S.costatum* の細胞密度は2番目に大きい19,200cells/mLに達していた。

#### e) DO

上記のpH最高時に0m層のDOは12.2mg/Lとなり最大値を示した。最低濃度は3.8mg/L(2006年10月17日、B+1m層)で、この日以降一週間程度晴天が続く、この間に *S.costatum* は増殖過程にあったとみられ遂には最大規模の増殖に至っている。

#### f) NH<sub>4</sub>-N

2005年及び2006年では *S.costatum* が高細胞密度に至る過程でNH<sub>4</sub>-N濃度の減少傾向が示され、その低下濃度はそれぞれ6.3μM, 2.9μMであった。

#### g) NO<sub>2</sub>-N

無機3態窒素の中で最も鉛直較差が大きく示されており、その最大較差は2003年と2006年で *S.costatum* の増殖時にみられた。

#### h) NO<sub>3</sub>-N

2006年10月の最大増殖時の濃度は0.1μMで、これに至る前の9月濃度が11.7μMであり、この間に大きな濃度低下が示された。しかし、2004年には出水により硝酸性窒素含有の土砂が大量に流入し15μM前後の高濃度に至っていたが、このケースでは本種の増殖は起こらなかった。

#### i) PO<sub>4</sub>-P

*S.costatum* の増殖過程では2005年及び2006年に0m層のPO<sub>4</sub>-P濃度の減少傾向が示され、その低下濃度はそれぞれ0.3μM, 0.9μMであった。

j) DIN

2004年で10月末～11月上旬の2時期の0m層値は20 $\mu\text{M}$ 以上の最高濃度となった。その後20日間経過して0.6 $\mu\text{M}$ まで低下したが、11月25日の*S. costatum*の細胞密度は前期の0から5,660cells/mLまで増殖している。

k) (NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N)/NH<sub>4</sub>-N

2005年だけは3層ともに比較的小さな変動で推移したが、他の年で特に5m層、B+1m層は25以上も大きく変動する時期が示された。この変動時期には*S. costatum*の大増殖は起こっていない。

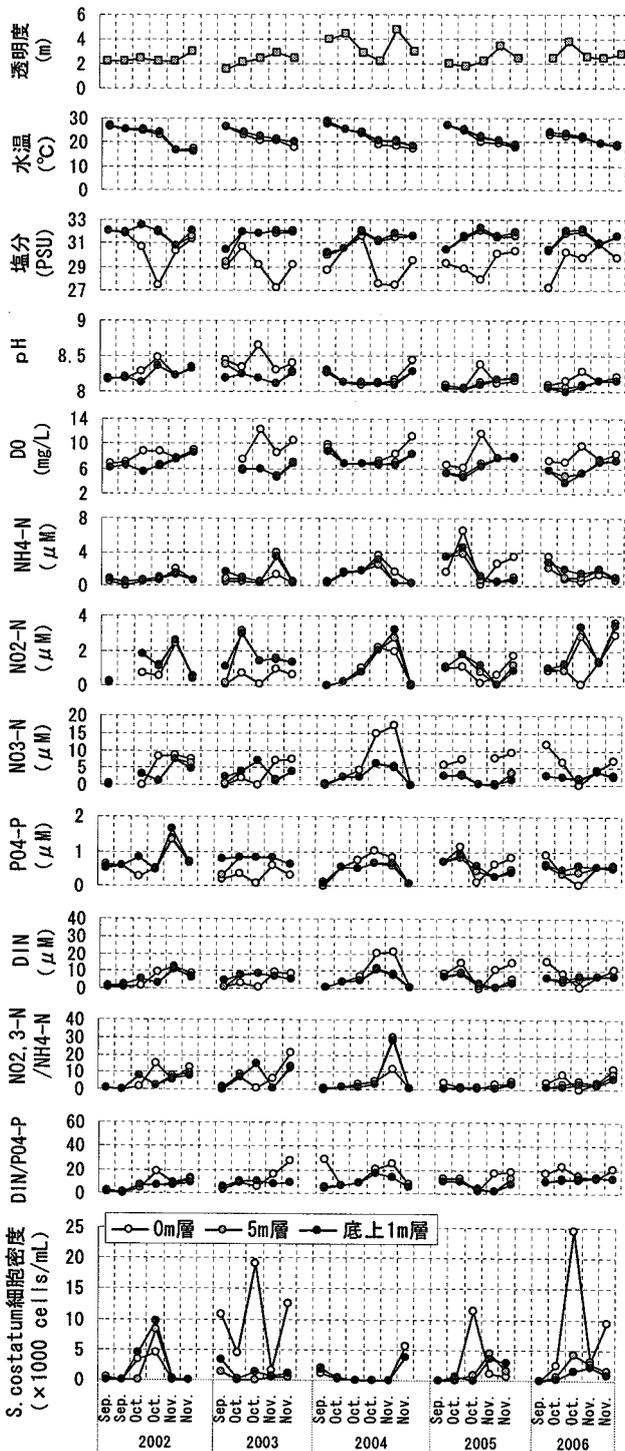


図-4 秋季における水質と*S. costatum*細胞密度の変動

l) DIN/P04-P

レフトフィート比 (N:P=16:1) を基準にして鉛直的にみた場合、16を上回るケースは0m層が全体の41%でこれより下層の2層はともに5%以下の割合であった。また、*S. costatum*が最高細胞密度に至った2006年をみると、0m層の比は赤潮発生前が18、24と窒素が過剰気味であったが、発生時にはその比は15まで低下している。

(3) 大増殖時の水温・塩分と栄養塩分布

図-5に各年のSt.2における水温・塩分と*S. costatum*の細胞密度との関係を示す。縦軸の指数は*S. costatum*の最高細胞密度24,600cells/mLを1.0として表した。秋季における本種の増殖時の水温は17～27 $^{\circ}\text{C}$ 、塩分は27.9～32.1PSUの範囲であった。

*S. costatum*が大増殖する場所は毎年横島海岸に面するSt.2であった。ここは白川、坪井川及び唐人川の3河川が流入する場所で、これら河川水の影響による低塩分の沿岸水と外海水との境界が認められている<sup>2)</sup>。図-6に示すように、*S. costatum*の最高細胞密度に達する8日前の栄養塩の分布をみると唐人川河口海域が高濃度となっていた。

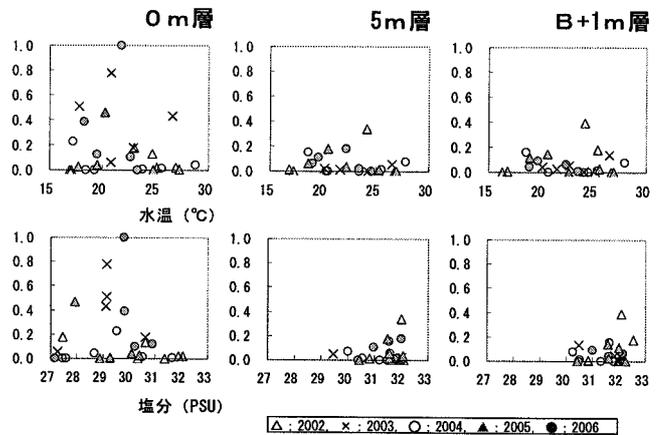


図-5 *S. costatum*細胞密度と水温・塩分の関係

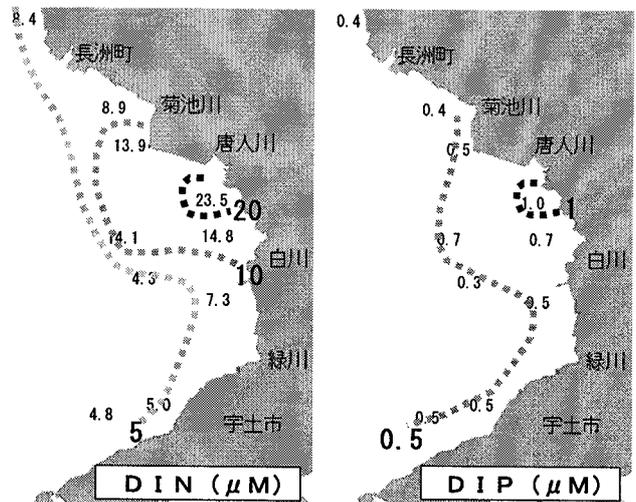


図-6 *S. costatum*最高細胞密度8日前のDIN・DIPの分布

#### (4) 増殖時と非増殖時における環境特性

図-7 は、2002~2006 年秋季における *S.costatum* の増殖時と非増殖時における環境要因毎の観測値である。本種が大増殖に至るケースでの観測当初の水温、塩分はそれぞれ 20.8~24.8℃, 27.26~30.64psu の範囲であり、非増殖時の範囲内の値であった。したがって、水温と塩分は絶対的な増殖条件にはなっておらず、その他の環境条件が整うことで秋季においてはほぼすべての時期に *S.costatum* の大増殖は起こり得るものと考えられる。

気象要素で見ると増殖時では、7~11日間前までの総日降水量は10~27mmで、非増殖時の方は最高値が64mmと大きかった。一方、大増殖する前の7~11日間の最大日照時間及び日射量はそれぞれ9.6時間、17.7MJ/m<sup>2</sup>で非増殖時を上回る値となっていた。

次に、DIN, DIPの最高値も非増殖時の方がそれぞれ27.5μM, 1.8μMとやや上回っていた程度で、両者には有意な差は示されなかった。

以上のことから、本種の赤潮予測要素として水温、塩分及びDIN, DIPを取り込むのは困難と結論づけた。

大増殖前日の海況をみると、干満差は増殖時の方が小さく、また日最大風速の範囲も非増殖時に比べて0.9~5.4m/s下回る値であった。このことは、大増殖に至るには個々の細胞が大きな流動により逸散しないことが必要であるため、潮流や波浪の関与が大きいことが示唆された。

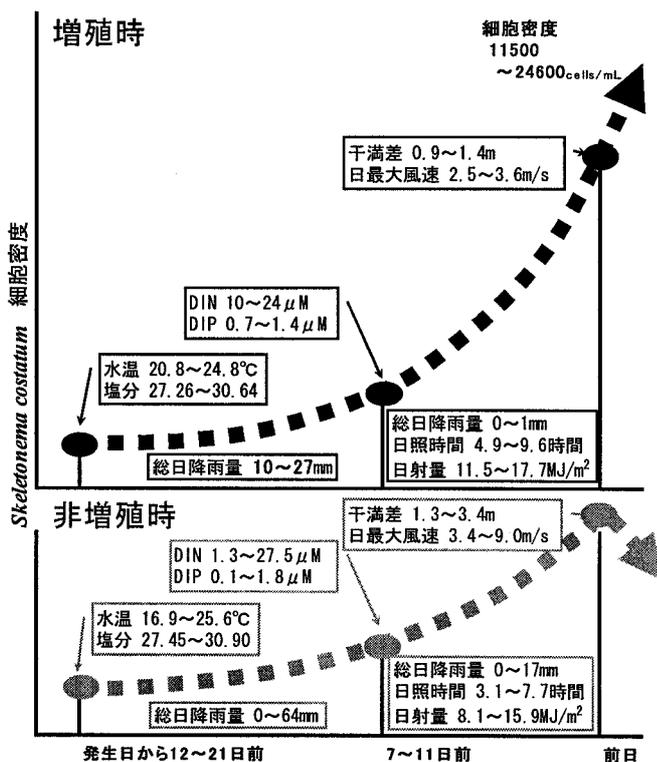


図-7 *S.costatum*の増殖時と非増殖時における環境要因の観測値

#### 4. 本種の増殖再現手法の構築

##### (1) 増殖要因の抽出

本種の細胞密度は12~21日間に1回のデータであり、増殖再現にあたっては用いられる環境要因毎の観測値の抽出時期が問題となる。そこで、本種細胞密度と抽出時期別のこれら気象・海象観測値との関係を求めた。この結果、表-1に示すように、日照時間と日射量は降雨後の3日間値に、日最大風速及び干満差は前日値にもっとも高い相関係数が得られた。

表-1 気象・海象観測値と本種細胞密度との相関係数

抽出時期	日照時間	日射量	日最大風速	干満差
直前10日間	0.42	0.29	0.03	0.07
直前3日間	0.31	0.34	0.06	0.43
降雨翌3日間	0.53	0.50		
前日			0.37	0.48

##### (2) 重回帰分析

以上により、本種の増殖過程には日降水量、日照時間、日射量、日最大風速及び干満差が影響を及ぼしている可能性が考えられた。また、これら5要素の他にも本種と競合関係にあると考えられた珪藻を見出し、調査開始日の細胞密度を加えた。

そこで本種の増殖再現について、従来より特定海域では赤潮予測手法<sup>8)</sup>として用いられている重回帰分析を行った。説明変数にはこれら6要素を用いて(1)式により細胞数を推算した結果、図-8に示すように全体的に高い相関係数は得られるものの、より大規模な増殖時ほど再現性がよくなかった。これに関しては、多重共線性が影響しているとみられたが、相関行列により説明変数を省いた場合でも再現性は改善されなかった。

$$Y = -312.5 X_1 + 5716.9 X_2 - 3280.1 X_3 - 3327.1 X_4 + 17.2 X_5 + 0.7 X_6 + 34704.5 \quad (1)$$

ここで、Y: 予測値(細胞/mL), X<sub>1</sub>: 日降水量(mm), X<sub>2</sub>: 日照時間(h), X<sub>3</sub>: 日射量(MJ/m<sup>2</sup>), X<sub>4</sub>: 日最大風速(m/s), X<sub>5</sub>: 干満差(cm), X<sub>6</sub>: 競合種(細胞/mL)である。

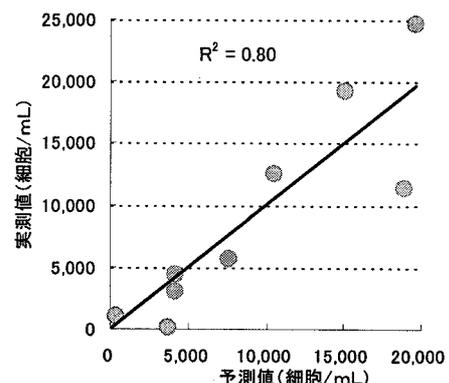


図-8 重回帰分析による*S.costatum*細胞密度の実測値と予測値の関係

### (3) SI モデルの作成と HSI の算出

以上の結果から、大増殖ケースにおいても再現性を高めるために、倉原ら(2009)<sup>3)</sup>が行っている環境影響評価手法の一つでHEP(Habitat Evaluation Procedure)のHSI(Habitat Suitability Index)モデルを応用した手法の適用を検討した。この手法は、人工干潟のアサリ生息条件の検討<sup>4)</sup>でも用いられているが、本種の増殖要因として挙げた6要素すべてを包含的に扱うことができると考えられた。

作成した各増殖要因のSIモデルを図-9に示す。ここで、SI曲線の設定にあたっては、各環境要因において本種が増殖した時と増殖できなかった時の数値をより適性に表現する必要がある。各環境要因におけるSI曲線の設定根拠は表-2に示すとおりである。

表-2 本種増殖要因のSI曲線設定根拠<sup>5,6,7)</sup>

増殖要因	SI曲線の設定根拠
日降水量	適度の降雨に伴い陸地から栄養塩類、有機物、微量金属などが流入して増殖を促すといわれている。しかし一方で、多雨である場合は、懸濁物により光合成活性の低下が考えられる。
日照時間	珪藻類に属する本種は、より高い光合成活性下では増殖速度が速まることが示唆されており、それには日射量や日照時間が影響すると考えられる。
日最大風速	風速が大きくなるほど、高波浪によって増殖過程での細胞群が水平方向に移動・分散してしまい高密度群に発展し難いと考えられる。さらに、底質の巻き上げによって発生する濁りは光合成を阻害し大増殖の妨げになると考えられる。
干満差	干満差が大きくなる大潮期では潮流が速まることにより、増殖海域の流動も増大し本種の増殖速度よりも拡散速度が上回ることが想定される。この結果、高密度に至り難いことが考えられる。
競合種	本種よりも先に大増殖する種の出現によって、栄養競争的に不利になると考えられる。また、その種の代謝産物による増殖阻害作用も指摘されている。

これら6要素のSIモデルを算術平均法、幾何平均法で統合した場合の決定係数は、それぞれ0.45、0.60と低かった。しかし、限定要因法でHSIを算出したときの決定係数は図-10に示すように0.91であり高い相関が得られた。このことは、本種増殖に不都合な環境条件が強く影響を及ぼすことを示唆するものと考えられる。

これらの結果、図-11に示すように*S. costatum*の秋季大増殖を非増殖ケースも含めて再現性をみたところ、HSI算出値は大規模増殖時の細胞密度ともほぼ一致している。

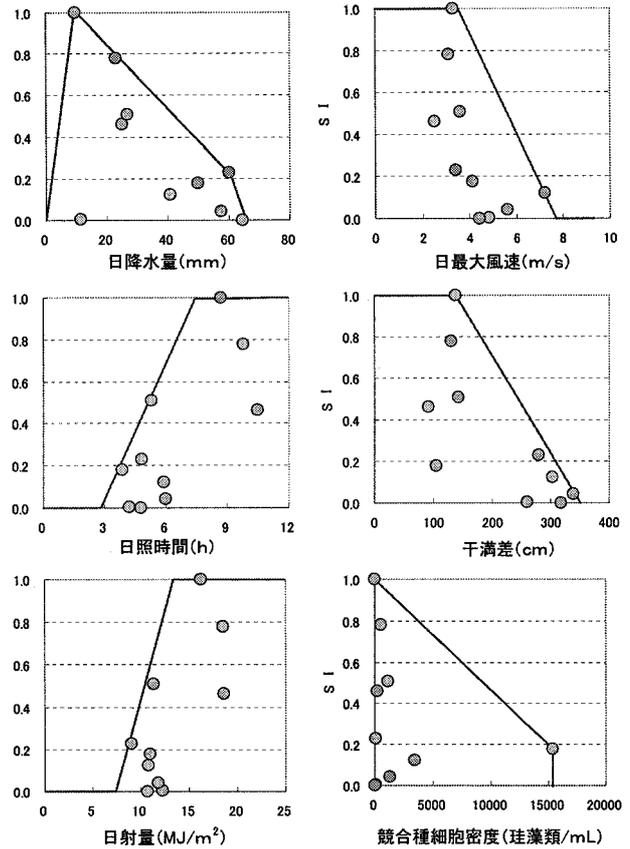


図-9 *S. costatum*のSIモデル

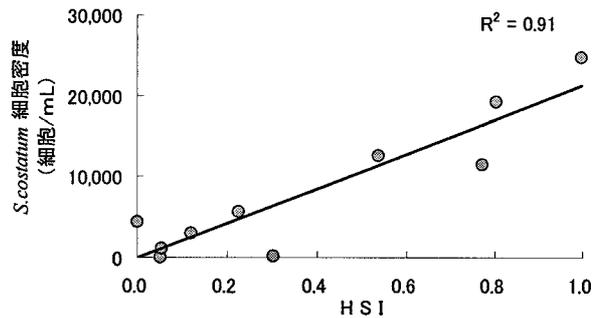
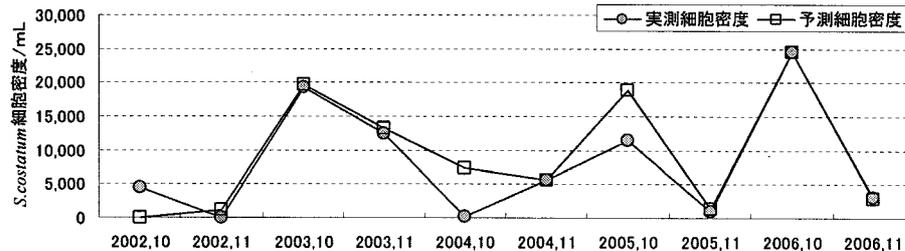


図-10 HSI算出値と実測細胞密度の関係



	2002,10	2002,11	2003,10	2003,11	2004,10	2004,11	2005,10	2005,11	2006,10	2006,11	
SI	日降水量	0.4	0.1	0.8	0.7	1.0	0.2	0.8	0.3	1.0	0.5
	日照時間	0.2	0.4	1.0	0.5	0.3	0.4	1.0	0.7	1.0	0.7
	日射量	0.6	0.6	1.0	0.7	0.8	0.3	1.0	0.7	1.0	0.6
	日最大風速	0.9	0.8	1.0	1.0	0.7	1.0	1.0	0.5	1.0	0.1
	干満差	1.0	0.1	1.0	1.0	0.4	0.3	1.0	0.1	1.0	0.2
	競合種	0.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	0.8

図-11 *S. costatum*実測細胞密度と予測細胞密度の比較及びSI値

#### (4) HSI モデルの適用限界

HSI モデルは、対象生物の増殖要因の絞込みとその好適・不適数値が現場観測などによって判明しなければ全く機能しない。今回の要因選定にあたっては、*S. costatum* の秋季大増殖に気象・海象条件の関連性が大きいという考えに基づいている。しかし、それら観測データの抽出時期等の問題により、2004年10月のように非増殖時においても高細胞密度が予測された。よって、各年の細胞密度を段階的に精度高く予測できる HSI モデルの構築には限界がある。

#### 5. 結論

本種の増殖過程には降水量、日照時間、日射量、日最大風速、干満差及び競合珪藻密度が影響を及ぼしている可能性を見出し、HSI モデルによる増殖再現を試みた。これら増殖要因の SI モデルの統合は、限定要因法を選択し HSI を算出した。この限定要因法の選択は、本種が大増殖できない状況を作り出す要因が、増殖過程では結果的に大きく影響を及ぼすという考えからである。本研究で用いた HSI 算出式を以下に示す。

$$HSI = \text{最小値 (全増殖要因項目)}$$

本種の各 SI モデル最大値は、日降水量が 10mm、日照時間が 7.4 時間以上、日射量が 13.4MJ/m<sup>2</sup> 以上、日最大風速が 0~3.5m/s、干満差が 0~137cm、競合珪藻密度が 20 細胞/mL 以下である。これら各 SI モデル最大値が増殖途中もしくは終盤で重なったケースでは、2006 年 10 月のように 2 万細胞/mL 以上の最高細胞密度にまで高まっていた。

この結果、*S. costatum* の秋季大増殖を非増殖ケースも含めて再現性をみたところ、HSI 算出値は現場海域で起きた大規模増殖時の細胞密度とほぼ一致した。

2003 年の 10、11 月、2005、2006 年の 10 月のように大増殖レベルを 1 万細胞/mL 以上とした場合には、6 増殖要因すべての SI 値が 0.5 以上の高い値であった。

したがって、できるだけ早い段階で前もって高い SI 値を予測するのであれば、以下に示すような赤潮予報がイメージされる。

The weather forecast and red tide prediction							
Date	27-Oct	27-Oct	28-Oct	29-Oct	30-Oct	31-Oct	1-Nov
Weather							
	Rain	Rain	Fine	Fine	Fine	Cloudy after fine	Fine after cloudy
Probability of rain(%)	10	100	0	0	0	30	20
Tide level(cm)	330	310	280	250	210	160	130
Wind velocity (m/s)	6	8	5	3	2	2	2
Probability of red tide(%)	0	0	0	0	10	50	70
Cause species	<i>Skeletonema costatum</i>						

図-12 赤潮予報のイメージ

#### 6. おわりに

本研究の結果、熊本沿岸海域においては本種と競合する珪藻密度が低く、降雨直後の長時間の日照と強い日射量が数日間連続し、その後強風による表層水の攪乱時期や大潮期に至る潮流増大がないケースでは本種が大増殖する可能性が示唆された。さらに HSI モデルの改良・工夫によっては発生海域毎の赤潮予測を行う上で有効な手法になり得るものと考えられた。

今後は、改良した HSI モデルによる赤潮発生予測手法を他海域で検証する必要がある。

謝辞：研究にあたり、熊本県水産研究センター研究スタッフの皆様には、調査データ及び参考文献の提供など大変お世話になりました。ここに記して謝意を表する次第です。

#### 参考文献

- 園田吉弘・滝川 清・齋藤 孝：有明海における赤潮発生と海域環境の変動特性，海洋開発論文集 第24巻，pp. 615-620, 2008.
- 滝川 清・秋元和實・平城兼寿・田中正和・西村啓介・島崎英行・渡辺 枢：有明海熊本沖の水塊構造と表層堆積物分布特性，海岸工学論文集 第52巻，pp. 956-960, 2005.
- 倉原義之助・森本剣太郎・増田龍哉・鐘ヶ江潤也・古川恵太・滝川清：干潟再生に向けた生物生息環境評価モデルの活用に関する検討，海岸工学論文集 第54巻，pp1401-1405, 2007.
- 増田龍哉・五十嵐学・滝川清・森田将任・甲斐秀就・森本剣太郎：熊本港の人工干潟におけるアサリの生息条件把握に向けた基礎的研究，海洋開発論文集 第25巻，pp. 305-310, 2009.
- 遠藤拓郎：第3節 赤潮の発生環境，赤潮に関する近年の知見と研究の問題点，水産資源保護協会，水産研究叢書33，pp69-73, 1980.
- 飯塚昭二：大村湾における *Gymnodinium* 65年型赤潮の発生機構，日本プランクトン学会報19，pp22-23, 1972.
- 岡市友利[編]：赤潮の科学（第二版），恒星社厚生閣，1997.
- 櫻田清成・山形卓・小山長久・糸山力生：八代海における有害赤潮 *Chattonella antique* の発生予察，熊本県水産研究センター研究報告，2008.
- 一見和彦・宮尾和宏・門谷茂：瀬戸内海引田湾における有害赤潮鞭毛藻 *Karenia mikimotoi* (渦鞭毛藻) の赤潮発生年と非発生年の海域環境の比較，日本プランクトン学会報 第54号 第1号，pp9-15, 2007.