

伊勢湾における赤潮指標と第5次水質総量規制に見る環境変化

鈴木 千賀 (suzukic@nagoya-u.jp)
〔名古屋大学〕

Environment Change due to red tide indicates and the Chapter V of the Water Pollutant Control Law in Ise Bay
Chika Suzuki
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan

Abstract

In general, red tide indicates a visual and customary name for the “phenomenon that microalgae in seawater proliferate abnormally, causing a sudden change in sea surface color.” However, this is not sufficient to quantitatively understand red tide, and the definition of red tide is not clear. On the other hand, the Ise Bay is considered to have eutrophication and red tide is regularly observed in the Bay. Although the load of nutrient salts has been decreasing, the Bay is one of the areas where determining the relation between red tide and water quality control is difficult. In this study, the author established the criteria to define red tide (red tide index), applied a stepwise method to a multiple regression model, and determined a stable model that has *Chl-a* (red tide index) as its explanatory variable. Environmental influence was captured by the change in the coefficient of determination of the red tide index model, which implicitly indicated the influence of the Fifth Regulation of Total Pollutant Load Control.

Key words

Chl-a, red tide indices, Chapter V of the Water Pollutant Control Law

1. はじめに

植物プランクトンの異常増殖現象である赤潮の頻発は閉鎖性水域における水質汚染の産物であるという見方がされている。伊勢湾においてもそれは頻発している。

一方、水圏の環境政策として知られる「水質総量規制」は閉鎖性水域の水質環境基準を確保するために、環境に排出される汚濁物質の総量を一定量以下に削減する法制度のことであり、赤潮対策としての意義が深い。現在、対象となる閉鎖性水域は、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の3水域であり、2001年度実施の第5次水質総量規制からはT-N（全窒素）、T-P（全リン）の削減が開始された。

ただし、赤潮野発生と規制との関係性については「瀬戸内海では赤潮発生件数、水質規制に有意な対応関係が見られる（本城, 1991）」とあるものの伊勢湾、東京湾では水環境の改善と赤潮との対応関係についての明確な表現が見られず、規制の効果に関する知見が十分とは言い難い。このような背景のもと、鈴木（2007, 2008, 2009）は東京湾をフィールドとし、赤潮の判断基準（赤潮指標）項目の変動と第5次水質総量規制との関係を重回帰モデルの新規利用技術を用いながら明らかにしてきた。本研究の目的はフィールドを伊勢湾に定め、東京湾と異なり観測項目が少ない伊勢湾でも、生物学的場合わけをした目的変数を用いることで、同様の技術を適用して両者の関係性を見出すことにある。

2. 資料と方法

2.1 資料 - データベース

愛知県が管轄する伊勢湾における調査点のうち観測項目を不足無く調査している調査点のみを抽出した（Figure 1）。これら調査点で得られた結果を収録した「公共用水

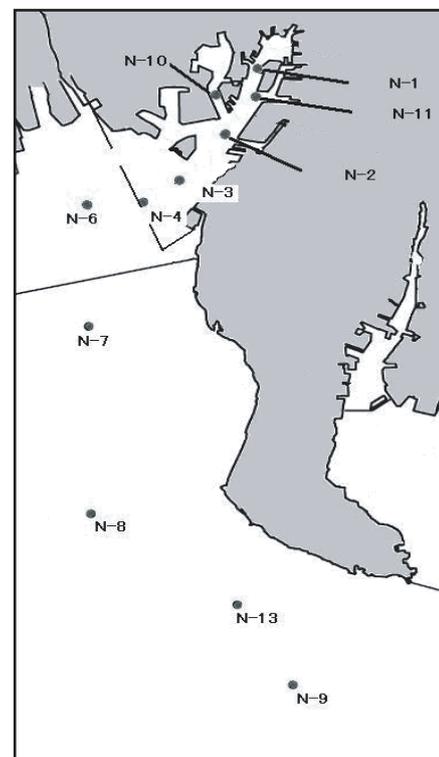


Figure 1: Location of sampling sites in the inner area of Ise Bay
Note: Point/N-1-4, 6-10, 11, 13

Table 1: List of survey items for water quality measurement survey of Ise Bay

天候	流況 (direction、mを数値化)	気温 (°C)	水温 (°C)
流量 (m³/s)	採取水深 (m)	全水深 (m)	色相
臭気	透視度 (m)	透明度 (m)	満潮時刻 (t・s)
干潮時刻 (t・s)	風向 (方位)	風速 (m)	DO (mg/L)
水色	pH	COD (mg/L)	SS (mg/L)
n-ヘキササン抽出物質 (mg/L)	全窒素 (mg/L)	全燐 (mg/L)	全亜鉛 (mg/L)
カドミウム (mg/L)	全シアン (mg/L)	鉛 (mg/L)	六価クロム (mg/L)
砒素 (mg/L)	総水銀 (mg/L)	アルキル水銀 (mg/L)	PCB (mg/L)
ジクロロメタン (mg/L)	四塩化炭素 (mg/L)	1,2-ジクロロエタン (mg/L)	1,1-ジクロロエチレン (mg/L)
シス-1,2-ジクロロエチレン (mg/L)	1,1,1-トリクロロエタン (mg/L)	1,1,2-トリクロロエタン (mg/L)	トリクロロエチレン (mg/L)
テトラクロロエチレン (mg/L)	1,3-ジクロロプロパン (mg/L)	チウラム (mg/L)	シマジン (mg/L)
チオベンカルブ (mg/L)	ベンゼン (mg/L)	セレン (mg/L)	硝酸性窒素 (mg/L)
亜硝酸性窒素 (mg/L)	ふっ素 (mg/L)	ほう素 (mg/L)	フェノール類 (mg/L)
銅 (mg/L)	鉄 (溶解性) (mg/L)	マンガン (溶解性) (mg/L)	クロム (mg/L)
亜鉛 (mg/L)	トリハロメタン生成能 (mg/L)	クロロホルム生成能 (mg/L)	ブロモジクロロメタン生成能 (mg/L)
ジブロモクロロメタン生成能 (mg/L)	ブロモホルム生成能 (mg/L)	アンモニア性窒素 (mg/L)	亜硝酸性窒素 (mg/L)
硝酸性窒素 (mg/L)	有機性窒素 (mg/L)	溶存態窒素 (mg/L)	懸濁態窒素 (mg/L)
オルトリン酸態燐 (mg/L)	電気伝導率 (A・V-1・m-1)	塩化物イオン (mg/L)	塩分
陰イオン界面活性剤 (mg/L)	Chl-a (mg/L)	フェオ色素 (mg/L)	大腸菌群数 (MPN/100mL)

Note: The units are based on the JIS method.

域の水質調査結果 (愛知県, 1996 ~ 2007) の 1995 年度から 2006 年度までの観測項目を整理して、データベースを作成した (Table 1)。観測項目は環境省が規定する健康項目、生活環境項目において欠測は見られないが愛知県の調査においては、例えば大内 (1981, 1982, 1986) 及び鈴木 (2008, 2009) にて赤潮指標としての利用が見られる PON (Particulate Organic Nitrogen: 懸濁態有機窒素) 等は計測されていない (これは、各自自治体の裁量に任されている測定項目である)。

本研究では目的変数に赤潮指標を据え置くが、一般に赤潮とは「海水中で浮遊生活をしている微細藻類が、突然、異常繁殖し海水の色が変わる現象」の視覚的な慣習的呼称のことを指す。しかし、これでは赤潮の定量把握には不十分であり、必ずしも赤潮の定義は明確にはなっていない。赤潮の判断基準は調査の手法、研究者によって少しずつ異なっているため、先の PON の様に赤潮の判断基準として用いられている測定項目 *Chl-a* を新たに赤潮指標として選択し、それを場合わけしてから目的変数として使用することとした。

2.2 資料 - 細胞のステージ選択 (生物学的場合わけ)

微細藻類や細菌を含む微生物は、生活環として誘導期、対数増殖期、定常期、死滅期の各期をもつ。*Chl-a* 及びその分解物であるフェオ色素を用いてデータを場合わけすることでより生物現象に近似した赤潮指標解析が可能となる。ただし、誘導期は赤潮無発生期であり、対数増殖

期の時間的スパンは非常に短い。さらに、鈴木 (2008) による東京湾における事例では死滅期に該当するモデルが説明率が高く安定していることがわかっている。

従って、赤潮の動向を知るためには、一側面ではあるが死滅期のデータを用いてモデルを作ることが適当であると考えられる。赤潮のタイミングは先の鈴木 (2008) を元に *Chl-a*/ フェオ色素の割合をもとに場合分けをした (誘導期 ~ 対数増殖期は 1.5 以上、定常期は 1 ~ 1.49、死滅期は 0 ~ 0.9)。1995 年度から 2006 年度までの全 1576 点分のうち、死滅期のデータベースは 402 点分となった。

2.3 方法

そのうち 1995 年度から 2000 年度までの定常期および死滅期全 176 点分の電子データベースを用いた最適重回帰式を以下の方法で決定した。

- (1) 欠損項目、物理的非関係性項目、変換をしても正規性が得られない項目を除外
- (2) 8 項目を選択; 気温 (Tem.)、水温 (WTem.)、pH、溶存酸素 (DO)、全窒素 (T-N)、全燐 (T-P)、塩分 (sal.)
- (3) 7 説明変数の全ての組み合わせである全 127 重回帰式を変数の打ち切り基準を $\alpha = 0.15$ とした逐次選択法によって絞り込み
- (4) 5 項目を有するモデルの完成; T-N、pH、DO、気温、T-P
- (5) 選択した最適重回帰式は VIF (分散拡大因子) < 10 を満たし、多重共線性がないことを確認

(6) 後述の正規確率プロット (Figure 2)、残差対適合値 (Figure 3)、残差対データ順序 (Figure 4) にてモデルの正規性、独立性、分散度合いを確認

残りの 2001 年度から 2006 年度までの死滅期全 226 点分の電子データベースは規制の前後となる 2002 年 10 月を境として 2 群に分割した。そして、2001 年 4 月～2002 年 9 月及び 2002 年 10 月～2006 年度における赤潮指標 *Chl-a* を目的変数とする重回帰式の説明率の推移から赤潮指標と第 5 次水質総量規制に見る環境変化を検証した。なお、赤潮指標と規制との直接的関係を明確に示すため、補足的検証として、*Chl-a* と T-N、T-P との偏相関係数も算出した。

3. 結果

定常期および死滅期の *Chl-a* 赤潮指標モデル (最良重回帰モデル) はデータ数を 176 とした時、次の通りである ($\alpha = 0.15$, step-wise method)。

$$\begin{aligned} Chl-a = & -150 + 9.61 \text{ T-N} + 11.8 \text{ pH} + 4.77 \text{ DO} \\ & + 0.697 \text{ Tem.} + 92.2 \text{ T-P} \end{aligned}$$

赤潮プランクトンの生育に関係するものとして、N、P (T-N、T-P)、pH、DO、気候要因 (Tem.) 等が挙げられている (日本水産学会, 1980、岡市, 1997 など)。選択された 5 つの説明変数は赤潮を構成するプランクトンとの関係の深い項目であることがわかる。また、VIF は T-N が 2.5、pH が 2.2、DO が 2.0、Tem. が 1.4、T-P が 3.3 であり、VIF < 10 であることからこのモデルにおいて多重共線性は見られていない。

Figure 2～4 はこのモデルの検定結果である。重回帰式における残差の正規確率プロット (Figure 2) では、残差はおおよそ直線に従っており残差は正規分布から著しく逸脱していないことが確認された。

残差対適合値 (Figure 3) では特異なパターンは見られず分散の一定性が保たれており、残差対データ順序 (Figure 4) においてはランダムなパターンが展開されていることから誤差の独立性の過程が確認出来た。

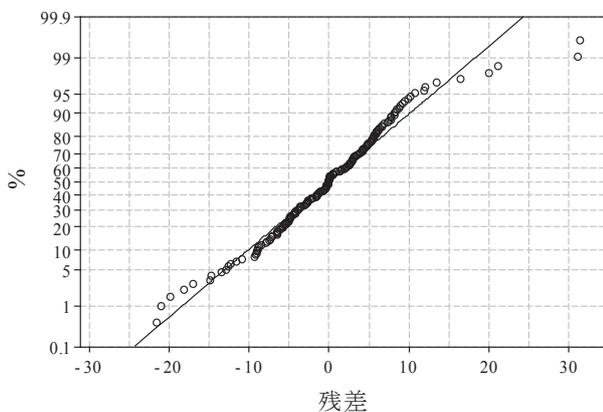


Figure 2: Normal probability of the residuals: *Chl-a* response (1995 to 2000)

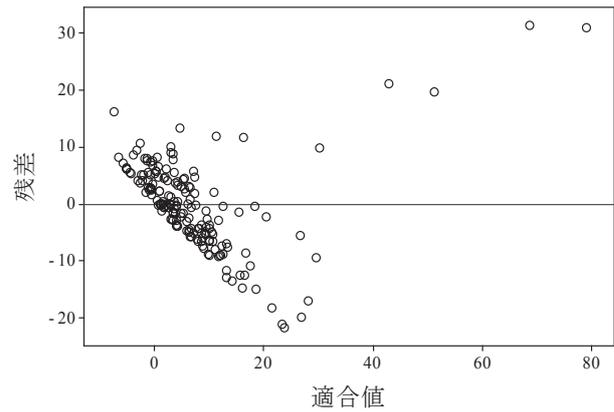


Figure 3: Fitted values and the residuals: *Chl-a* response (1995 to 2000)

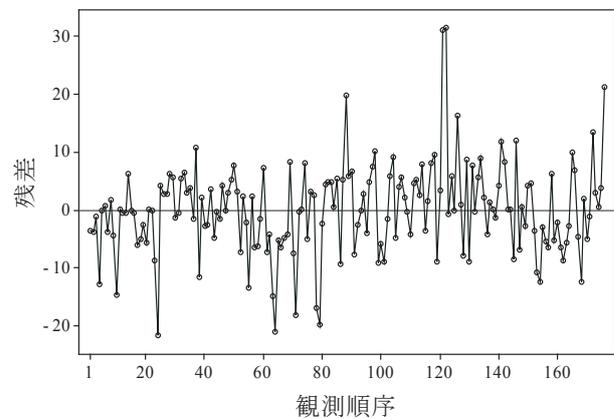


Figure 4: Order of the data and the residual (1995-2000): *Chl-a* response

また、回帰式の係数に対する t 検定の結果は $P \leq 0.001$ ($|t| > 9.24$ 臨界値以上) である。同様に分散分析の結果は $P = 0.00$ ($F = 66.92$ 臨界値以上) である。P 値はともに 0.05 より小さくこのモデルは統計的に有意である。以上により、上記の重回帰式の結果を受け入れる前提条件は整った。

以下は解析結果である。本重回帰式における自由度を修正した寄与率は $R^2_{adj} = 0.653$ である。従って、測定され

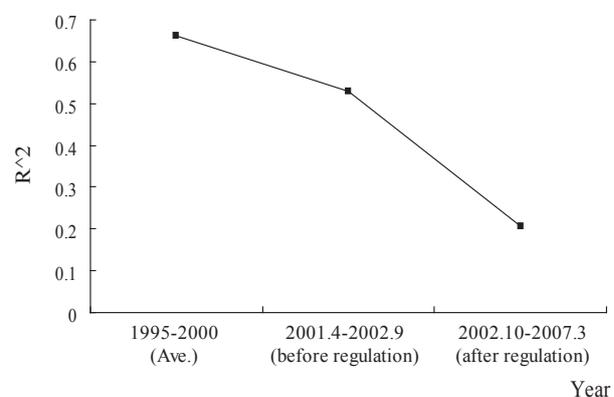


Figure 5: R^2 estimated by the multiple regression model derived from data from 1995 to 2000

た *Chl-a* は、この重回帰モデルにより実測値の変動の約 65% を説明出来たことになる。推定された死滅期 *Chl-a* と実測値の相関 (R^2) は 1995～2000 年 (Ave.) で 0.663、2001 年 4 月から 2002 年 9 月 (規制前) にかけての R^2 は微動範囲で低下があるものの 0.528 の説明率を維持する一方で、2002 年 10 月～2006 年度 (規制後) の R^2 は 0.206 となり、急激に低下した (Figure 5)。

最後に第 5 次水質総量規制の規制物質である T-N、T-P と赤潮指標 *Chl-a* との単独の関係性を調べるために偏相関係数を求めたところ、1995-2000 年における *Chl-a* 対 T-N は 0.384 ($P < 0.00$)、*Chl-a* 対 T-P は 0.321 ($P < 0.00$) であった。一方、規制後の 2002 年 10 月～2006 年度 (規制後) における *Chl-a* 対 T-P は 0.252 ($P < 0.00$) であった。なお、2002 年 10 月～2006 年度 *Chl-a* 対 T-N は統計的に有意な結果が算出されなかったため除外した。

4. 考察及び展望

偏相関係数にも規制前後で変化が見られているが 2002 年 10 月から 2006 年度にかけての急激な R^2 の低下に、水質規制によるパラメーターの変動がひとつの要因として関与していることは明らかである。(愛知県 第 5 次総量削減計画の達成状況と伊勢湾の水質の現況) によると、愛知県で 5 年毎に出されている総量負荷経年変化でも、法律の実施につれて伊勢湾における T-N、T-P 濃度の顕著な低下が見られており、それは R^2 の低下と連動している。東京湾では T-P の影響のみが推測されたが、選択された式と偏相関の結果から伊勢湾でも T-P が赤潮指標へと影響を及ぼしているものと推測される。従って、T-P の人為的削減行為によるその絶対量の減少における影響が重回帰式におけるパラメーターの変動をおこし、2002 年 10 月～2006 年度の R^2 の大幅な低下を引き起こした可能性が示唆される。

環境省 (2001) にも見られるが、伊勢湾は東京湾と比較して農業系排水の割合が多く、水質総量規制の規制対象である工業排水の割合が低いという特徴がある。その一方で規制の直後からの影響を推測し、伊勢湾でも赤潮指標モデルを用いて赤潮指標と第 5 次水質総量規制との関係性を明らかにすることが出来た。

閉鎖性海域特有の「富栄養化」により、海底に溜まった栄養塩の溶出等も多いとされ、瀬戸内海と異なり伊勢湾、東京湾では水質の改善と赤潮の発生はリンクしないと見られてきた。規制との関係性や効果が定量的にはつきり見えてこないが故に自治体などでは赤潮に関わる調査の削減がなされている現状もある。これは危惧されなければならない面である。

本研究では、重回帰モデルを用いて環境評価をおこなったが、環境政策のうち、その有効性や実用性が十分に実証されていないものでも新たな技術導入により政策を再評価出来る可能性がある。

謝辞

本研究にあたり、名古屋大学大学院環境学研究科竹内

恒夫教授には水質総量規制等環境政策に関するご教示を頂きました。資料の収集においては同 竹内教授、環境省水・大気環境局閉鎖性海域対策室前室長・高橋康夫氏、渋屋豊氏、愛知県環境部水地盤環境課 後藤和也氏、横井歩氏、中根幸司氏にご支援を頂きました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

追記

本研究は R' 09 Twin World Congress (環境技術および資源マネジメント国際会議 2009) にて Excellent Presentation Award を受賞したテーマ：「Environmental measurement skills by red tide index model toward the control of the sea phenomenon accelerated by human activity」の研究をもとに、フィールドを伊勢湾に移し、生物学的場合わけなどさらなる改良を加え完成させた研究である。

資金面では科学研究費 (特別研究員奨励費 09J10712 研究代表者・鈴木千賀) の補助を受けました。

引用文献

- 愛知県 第 5 次総量削減計画の達成状況と伊勢湾の水質の現況 <http://www.pref.aichi.jp/cmsfiles/contents/0000004/4393/siryou3.pdf>.
- 愛知県 1996-2007 平成 7～18 年度公共用水域及び地下水の水質調査結果 全 12 冊.
- 大内晟・高山晴義 1981 主成分分析による赤潮図について 日本水産学会誌, 47 (10) 1275-1279.
- 大内晟 1982 重回帰式による赤潮発生予測 日本水産学会誌, 48 (9) 1245-1250.
- 大内晟 1986 フーリエ解析と重回帰モデルを用いた赤潮シミュレーション 日本水産学会誌, 52 (2) 203-207.
- 岡市友利編 1997 赤潮の科学 第二版 恒星社厚生閣 p.337.
- 環境省 2001 『化学的酸素要求量、窒素含有量及びりん含有量に係る総量削減基本方針に関する参考資料』平成 13 年 12 月.
- 鈴木千賀 2007 「赤潮指標を用いた環境計測」への期待—環境省・第 5 次水質総量規制— 水産週報 1742, 12-13.
- 鈴木千賀 2008 「赤潮指標を用いた環境計測」への期待 II—環境省・第 5 次水質総量規制— 水産週報 1753, 18-19.
- 鈴木千賀 2009 Environmental Impact due to the fifth stage of the Total Pollutant Load Control in the inner area of Tokyo Bay Approach by the model of Red Tide Index, *Journal of Environmental Conservation Engineering*, 38 (12), Inprinting.
- 日本水産学会 1980 赤潮—発生機構と対策 (水産学シリーズ) 恒星社厚生閣 p.143.
- 本城凡夫 1991 過ぎたるは及ばざるが如し—赤潮の話, 日本海洋学会編 海と地球環境 東京大学出版会.

(受稿：2009 年 10 月 13 日 受理：2009 年 11 月 5 日)