

三重県沿岸海域における長期スパンの海水水質の解析*

新家 淳治**・大熊 和行**

キーワード ①伊勢湾 ②沿岸海域 ③水質 ④主成分分析 ⑤透明度 ⑥海水温

要 旨

三重県沿岸海域における長期スパンでの海水水質の特性を検討した。用いた水質データは1989～2008年度の公共用水域水質調査結果である。三重県の沿岸海域は地形的に伊勢湾内部、湾口部、外洋に面した湾外部に大別される。この特性を考慮しながら、表層海水の水温、透明度、COD、全窒素、全リンの水質項目について、主成分分析法を用いて解析した。また、伊勢湾内部沿岸について海水温暖化の有無および影響を検討した。

その結果、県沿岸海域全体について、第1主成分は伊勢湾外成分の度合い(湾外度)またはその逆の湾内度、第3主成分は湾口度の指標と解釈できた。また、伊勢湾内沿岸では水温やCODは経時的に上昇していることが示唆された。環境省が新たな環境基準として採用を検討している透明度について、湾内部において透明度の変化と水温、COD、富栄養化の指標としての全窒素それぞれの変化との関係式を導出した。その結果、透明度の変化に対し、水温やCODの変化よりも全窒素の変化との関係が大きいことが示唆された。

1. はじめに

地球温暖化の影響として、気象、生態系、農業・食料生産、健康と人間社会などの分野でさまざまな事象が起きていると考えられている。水環境への影響については、海面上昇、河川での流量の変動、河川や沿岸海水の中・長期的な水温上昇などが報告されている¹⁻⁵⁾。およそ100年間にわたる日本全国の年平均気温の上昇率は+1.1℃(気象庁、2009)であるのに対して、日本周辺海域のおよそ100年間における年平均海面水温の上昇率は+0.7～+1.7℃である。そのうち、三重県沿岸に近接する四国・東海沖北部海域では+1.3℃の上昇率であり⁵⁾、水産資源や海洋の一次生産に影響を与え、さらに、沿岸域や内湾の水温の上昇は、

水質の悪化も引き起こすと予測されている⁶⁾。

地方環境研究所(地環研)が今後取り組むべき課題の一つに地球環境問題、たとえば、地球温暖化(または地域の温暖化)が提示されており⁷⁻¹⁰⁾、沿岸海域環境についても地球温暖化の影響評価が必要とされている。

三重県では、水質汚濁防止法に基づく公共用水域での常時監視結果が長期間継続的に蓄積されている。三重県の監視公共用水域は河川と海域からなり、海域は地形的には伊勢湾沿岸域と外洋に面した熊野灘沿岸域に大別される。このように性質の異なる海域でのデータの解析を試みる際に、両海域の水質がどの程度類似あるいは乖離しているかを先ず検討する必要がある。そこで、多変量解

* Analysis of Long-term Trend of Coastal Seawater Quality in Mie Prefecture

** Junji NIINOMI, Kazuyuki OOKUMA (三重県保健環境研究所) Mie Prefecture Health and Environment Research Institute

析手法を用いて海水温(WT), 透明度(Tr), 化学的酸素要求量(COD), 全窒素(T-N)および全リン(T-P)に関して, 過去20年間の常時監視結果データを用いて沿岸海域の水質の把握を行った。さらに, 伊勢湾内沿岸での海水温暖化の有無・影響を同手法を用いて解析した。

また環境省は, 現在の環境基準項目は住民が体感できるなどの直感的で理解しやすい指標とはいえない難いとして, 「閉鎖的・中長期ビジョン」¹¹⁾の中で今後新たな項目として底層溶存酸素量(底層DO)とともにTr^{11, 12)}の設定を検討している。海域の現在の環境基準設定項目であるCOD, T-NおよびT-P等は, 目標である環境基準を達成するために制御すべき指標(制御指標)¹²⁾であり, Trは海域の状態を表わす指標(状態指標)¹²⁾である。

Trが環境基準に採用された場合, この状態指標の基準を達成するためには, 従来からの制御指標をどのように制御すればよいかを知る必要がある。そこで, 伊勢湾内沿岸海域においてTrが有機汚濁の指標であるCODや富栄養化の指標であるT-N, T-P, さらにはWTの変化とどのように関連しているかを, 上記過去20年間の常時監視結果データを用いて検討したので, 併せて報告する。

2. 方 法

2.1 使用データ

- 1) 三重県沿岸海域における水質特性の解析対象データ: 1989~2008年度の20年間にわたる三重県公共用水域および地下水の水質測定結果¹³⁾に記載されたもののうち, 後述の伊勢湾内沿岸(湾内部), 伊勢湾口部沿岸(湾口部)および熊野灘に面する沿岸(湾外部)の計30調査地点(図1中のエリア①~⑦)での3,900組のデータである。使用した水質項目組はWT, Tr, COD, T-NおよびT-Pである。
- 2) 湾内部における海水温暖化の有無・影響およびTrの変化の解析対象データ: 上記水質測定結果¹³⁾に記載されたもののうち, 後述の伊勢湾内の計22調査地点(図1中のエリア①~③)で20年間にわたる年6回測定での1,327組のデータである。使用した水質項目組はWT, Tr, COD, T-NおよびT-Pである。

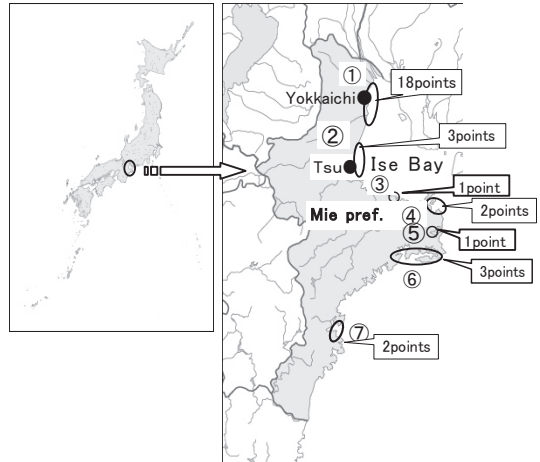


図1 三重県沿岸海域での試料採取地点

- 3) データ収集水深: 表層(水深0.5m)
- 4) 解析した水質項目: WT(°C), Tr(m), COD(mg/L), T-N(mg/L), T-P(mg/L)
- 5) 水質項目の測定方法: Trは透明度板法。COD, T-NおよびT-Pは昭和46年12月28日環境庁告示第59号¹⁴⁾による。
- 6) 調査地点: 図1において, 採水地点は, エリア①は四日市コンビナートの, エリア②は津市の, ③は松阪市の, エリア④は鳥羽市のそれぞれ沿岸域, エリア⑤は的矢湾, エリア⑥は英虞湾, エリア⑦は尾鷲湾である。

2.2 解析手法

三重県沿岸海域における水質特性, 伊勢湾内における海水温暖化の有無・影響およびTrの変化の解析には, 多変量解析手法(主成分分析PCA)¹⁵⁾を用いた。計算は, 青木のフリーソフトウェア¹⁶⁾を利用し相関行列法で行った。データ集団の分布の尖度および歪度の計算はMicrosoft Excel関数を, ヒストグラムの作成はMicrosoft Excelの分析ツールをそれぞれ用いた。

伊勢湾内の海水温暖化の有無・影響の解析については, 水質項目の年度変化を把握するためPCAに時間の概念すなわち年度因子を入れて実施した。また, Trの変化に関して, 有機汚濁の指標であるCODや富栄養化の指標であるT-N, およびWTの変化との関係を考察する際は, 年度因子を除いてPCAを実施した。

3. 結果および考察

3.1 三重県沿岸海域における水質特性のPCA結果

3.1.1 使用データの歪度、尖度の検討

多変量解析に供するデータ集団の分布は正規分布に近い方がデータ集団の特徴をより抽出しやすいので、各水質項目データについて歪度、尖度の検討を行った。正規分布の場合歪度は0である。尖度については0とする定義と3とする定義があるが¹⁷⁾、Excel関数の場合正規分布の尖度は0としている。

原データ、平方根値、対数変換値について、それぞれ歪度、尖度を求めた。その結果を表1に示した。Trは平方根値で、COD、T-NおよびT-Pは対数変換値で歪度、尖度ともに0に近づいた。WTについては、歪度は原データで、尖度は対数変換値で0に近かった。

そこで、WTについては原データを、Trについては平方根値(SQRT)を、COD、T-NおよびT-Pについては自然対数変換値(Ln)を用いることとした。

3.1.2 PCA結果

1989~2008年度までの20年間のWT、SQRT Tr、LnCOD、LnT-NおよびLnT-Pに沿岸海域の3つの地域(湾内部、湾口部および湾外部)の指標(統計的という「ダミー変数」)を入れてPCAを行った。結果を表2に示した。

主成分分析に分類型の因子を使うのは望ましくないという意見があるが、分類型のデータと組み合わせることによりいろいろな解析ができる¹⁵⁾。

得られたスコア値は相関係数行列に基づく主成分分析によるものであり、平均値と標準偏差にて標準化されている。第4主成分以下の固有値は1未満と小さく、原データ集団の全情報量に対する寄与が小さいので、第4主成分以下の主成分を無視し、第1主成分(Z(1))、第2主成分(Z(2))

および第3主成分(Z(3))で検討することとした。この3つの主成分の累積寄与率は79%であった。

Z(1)は原データの情報の約48%(寄与率)を説明している。Z(1)は、分類型因子である湾外部と湾内部の因子負荷量は符号が正と負で逆であるがそれぞれ絶対値は大きく、かつ、SQRT Tr(因子符号;正)、LnCOD(因子符号;負)、LnT-N(因子符号;負)、LnT-P(因子符号;負)の因子負荷量の絶対値も大きい。熊野灘に面した沿岸の水質は、伊勢湾内の沿岸水質に比べてTrは大きく、CODは小さく、T-NおよびT-Pとも小さいと推察されるので¹⁸⁾、Z(1)は湾外度(湾内でない度合い)を示していると考えられた。因子負荷量は該当主成分軸との相関性を表わしており、湾外度はCODやT-N、T-Pに対し負の相関性を有し、Trには正の相関性を有することが示唆された。なお、湾内である度合いから見るとその逆となる。

Z(2)の寄与率は17%で、WTの因子負荷量は負で絶対値が大きく、次いで湾外部の因子負荷量も負で絶対値が大きい。湾外部は、黒潮の影響を受けやすく、概してWTが高い¹⁹⁾ことからデータ集団の中では、温度の特徴的な要素を有すると考えられる。このことからZ(2)はWTに関する指標と考えられた。

Z(3)は湾口部の因子負荷量が正で絶対値が大きく、湾口度の指標と考えられた。水質汚濁指標との相関性は高くない。

関根ら¹⁹⁾によれば、三重県周縁の海域には2つのフロント(WTや塩分などの急変層)が形成されることが観測されており、一つは伊勢湾内と湾口の境界面、他の一つは湾口と湾外の境界面であり、本解析においても湾内、湾口および湾外の特徴が各主成分で表現・区分されており、関根らの

表1 各水質項目データの歪度および尖度

| Item (X) | Skewness | | | Kurtosis | | |
|----------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | X | SQRT X | Ln X | X | SQRT X | Ln X |
| WT | -0.0604 | -0.327 | -0.612 | -1.01 | -0.885 | -0.565 |
| Tr | 1.25 | 0.412 | -0.469 | 2.60 | 0.0717 | 0.560 |
| COD | 6.73 | 1.87 | 0.210 | 107 | 12.7 | 1.73 |
| T-N | 7.42 | 3.07 | 0.558 | 77.5 | 16.8 | 1.73 |
| T-P | 17.3 | 3.66 | 0.325 | 496 | 34.2 | 1.34 |

表 2 試料採取地点に関する 3 つの地域概念を含めた水質主成分分析結果

| | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnT-N | LnT-P |
|-----------|------|---------|-------|-------|-------|
| Average | 18.7 | 1.96 | 0.835 | -1.08 | -3.43 |
| U.E.V.*1 | 37.9 | 0.329 | 0.185 | 0.500 | 0.527 |
| St.Dev.*2 | 6.15 | 0.573 | 0.431 | 0.707 | 0.726 |

*1 U.E.V.: Unbiased Estimate of Variance

*2 St.Dev.: Standard Deviation

Correlation Matrix

| | Bay-mouth | Bay-out | Bay-in | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnT-N | nT-P |
|-----------|-----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Bay-mouth | | | | -0.026 | 0.209 | -0.146 | -0.177 | -0.165 |
| Bay-out | | | | 0.121 | 0.520 | -0.409 | -0.455 | -0.476 |
| Bay-in | | | | -0.100 | -0.601 | 0.464 | 0.523 | 0.537 |
| WT | -0.0265 | 0.121 | -0.100 | 1 | -0.263 | 0.398 | 0.150 | 0.224 |
| SQRT Tr | 0.209 | 0.520 | -0.601 | -0.263 | 1 | -0.602 | -0.583 | -0.556 |
| LnCOD | -0.146 | -0.409 | 0.464 | 0.398 | -0.60 | 1 | 0.476 | 0.519 |
| LnT-N | -0.177 | -0.455 | 0.523 | 0.150 | -0.58 | 0.476 | 1 | 0.711 |
| LnT-P | -0.165 | -0.476 | 0.537 | 0.224 | -0.56 | 0.519 | 0.711 | 1 |

Factor Loadings

| | Z(1) | Z(2) | Z(3) | Z(4) | Z(5) | Z(6) | Z(7) | Z(8) | Cont.Rate |
|-----------------|--------|--------|----------|--------|--------|---------|---------|-----------|-----------|
| Bay-mouth | 0.262 | 0.183 | 0.942 | 0.0744 | 0.0544 | -0.0359 | 0.0144 | -0.00834 | 1 |
| Bay-out | 0.738 | -0.533 | -0.312 | 0.195 | 0.177 | -0.0306 | 0.0587 | -0.0145 | 1 |
| Bay-in | -0.835 | 0.402 | -0.216 | -0.224 | -0.195 | 0.0491 | -0.0634 | -0.0154 | 1 |
| WT | -0.225 | -0.858 | 0.233 | -0.159 | -0.348 | -0.0476 | -0.0956 | -7.59E-06 | 1 |
| SQRT Tr | 0.824 | 0.124 | -0.0127 | 0.158 | -0.182 | 0.468 | -0.170 | 1.84E-05 | 1 |
| LnCOD | -0.738 | -0.341 | 0.131 | -0.289 | 0.357 | 0.332 | -0.0313 | 2.27E-05 | 1 |
| LnT-N | -0.790 | -0.057 | 0.000130 | 0.494 | 0.0998 | -0.0890 | -0.332 | 9.68E-06 | 1 |
| LnT-P | -0.804 | -0.110 | 0.0462 | 0.422 | -0.131 | 0.185 | 0.332 | -4.42E-06 | 1 |
| Eigen Value | 3.86 | 1.36 | 1.11 | 0.650 | 0.382 | 0.378 | 0.267 | 0.000518 | |
| Cont.Rate*3 | 48.2 | 17.0 | 13.8 | 8.12 | 4.77 | 4.72 | 3.33 | 0.00648 | |
| Acc.Cont.Rate*4 | 48.2 | 65.2 | 79.0 | 87.2 | 91.9 | 96.7 | 100 | 100 | |

*3 Cont.Rate: Contribution Rate(%)

*4 Acc.Cont.Rate: Accumulation Contribution Rate(%)

報告と一致しているものと考えられた。

3.2 湾内データによる PCA 結果

今回使用したデータでは伊勢湾内のデータが多いので、湾内沿岸海域にターゲットを絞って詳細な解析を行った。すなわち時間経過の概念(年度)を含めて PCA を行い、海水温暖化の影響を検討した。使用データの尖度・歪度を検討した結果 WT, SQRT Tr, LnCOD, LnT-N および LnT-P を用いることとし、得られた結果を表 3 に示した。

Z(1)は原データの情報の約45%を説明している。Z(1)は、各水質汚濁項目(LnCOD, LnT-N および LnT-P)の因子負荷量が正で絶対値は大きく、SQRT Tr では負で絶対値が大きいため、COD, T-N, T-P および Tr の各水質項目の特徴を含んだ水質汚濁の指標成分と解釈できた。

Z(2)は原データの情報の約21%を説明している。Z(2)は、時間経過(年度), WT および LnCOD の因子負荷量が大きく正である。とくに年度の因

子負荷量が大きく、続いて WT と LnCOD が同程度の大きさであった。このことから、Z(2)は時間経過による海水温暖化の指標成分と考えられた。データ期間の20年間に於いて、WT は上昇し、それに伴い COD も上昇傾向であることが示唆された。

図 2 に年度平均 WT の経時変化(年度変化)を示した。図 2 から海水温は温暖化傾向にあるように見える。図 3 に年度平均 Tr および年度平均 COD の経時変化(年度変化)を示した。図 3 から Tr および COD も経時的に微増しているように見える。すなわち、COD は増加しているのに Tr は改善しているように見える。

伊勢湾では総量規制により陸域からの COD の排出削減が実施されており、具体的には三重県の流域からは1989~2004年に COD で31%削減されている²⁰⁾。一方、閉鎖性湾内部では、海水温暖化により内部生産(植物プランクトンの発生、底質からの有機物の溶出等)が活発になると予想され、

表 3 伊勢湾内での水質主成分分析結果

(Sample Number 1327)

| | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnT-N | LnT-P |
|-----------|------|---------|-------|--------|-------|
| Average | 18.2 | 1.70 | 0.959 | -0.792 | -3.19 |
| U.E.V.*1 | 40.9 | 0.192 | 0.156 | 0.443 | 0.45 |
| St.Dev.*2 | 6.40 | 0.439 | 0.395 | 0.666 | 0.67 |

*1 U.E.V.: Unbiased Estimate of Variance

*2 ST.DEV.: Standard Deviation

Correlation Matrix

| | Fiscal Year | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnT-N | LnT-P |
|-------------|-------------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Fiscal Year | | 0.0217 | 0.184 | 0.0720 | -0.371 | -0.144 |
| WT | 0.0217 | 1 | -0.401 | 0.478 | 0.249 | 0.409 |
| SQRT Tr | 0.184 | -0.401 | 1 | -0.454 | -0.489 | -0.429 |
| LnCOD | 0.0720 | 0.478 | -0.454 | 1 | 0.321 | 0.383 |
| LnT-N | -0.371 | 0.249 | -0.489 | 0.321 | 1 | 0.688 |
| LnT-P | -0.144 | 0.409 | -0.429 | 0.383 | 0.688 | 1 |

Factor Loadings

| | Z(1) | Z(2) | Z(3) | Z(4) | Z(5) | Z(6) | Cont.Rate |
|-----------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|-----------|
| Fiscal Year | -0.273 | 0.815 | -0.432 | -0.170 | 0.191 | 0.0995 | 1 |
| WT | 0.643 | 0.445 | 0.2470 | 0.548 | 0.1297 | 0.103 | 1 |
| SQRT Tr | -0.756 | -0.0185 | -0.307 | 0.395 | -0.416 | 0.069 | 1 |
| LnCOD | 0.671 | 0.466 | 0.1573 | -0.242 | -0.498 | -0.0274 | 1 |
| LnT-N | 0.788 | -0.399 | -0.294 | -0.074 | -0.033 | 0.356 | 1 |
| LnT-P | 0.803 | -0.095 | -0.476 | 0.14986 | 0.0180 | -0.311 | 1 |
| Eigen Value | 2.78 | 1.25 | 0.680 | 0.571 | 0.476 | 0.249 | |
| Cont.Rate*3 | 46.3 | 20.8 | 11.3 | 9.52 | 7.94 | 4.16 | |
| Acc.Cont.Rate*4 | 46.3 | 67.1 | 78.4 | 87.99 | 5.8 | 100 | |

*3 Cont.Rate: Contribution Rate(%)

*4 Acc.Cont.Rate: Accumulation Contribution Rate(%)

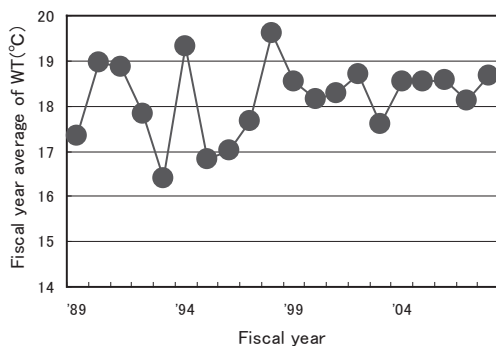


図 2 伊勢湾内での水温年度平均の変化

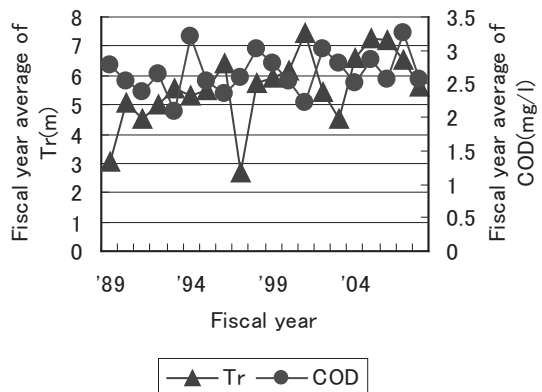


図 3 伊勢湾内での透明度と COD の年度内の変化

これらの加算要因・減算要因などの結果、**図3**で示したようにCODが微増していると考えられる。

また、年度平均T-Nは**図4**に示した経年変化から、時間経過とともに低下しているように見える。これは、総量規制による陸域からのT-N, T

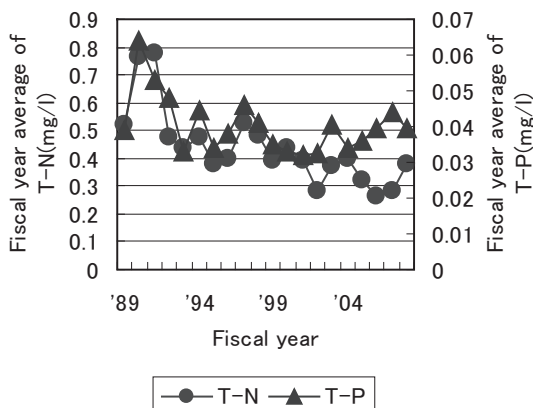


図4 伊勢湾内でのT-NとT-Pの年度平均の変化

-Pの排出削減(三重県流域からは1999~2004年にT-Nで10%削減²⁰⁾)の結果によりT-Nが低下しているためと推察される。

3.3 Trと他の水質項目との関係

環境省が海域の新たな環境基準項目として導入を検討しているTrについて考察した。前述のとおりTrは状態指標なので、既存の理化学指標との関係性を把握し、目標の状態を達成するための具体的方策を探る必要がある。そこで、伊勢湾内の前述と同じ過去20年間のデータを用い、年度因子は除外し、WTと各水質汚濁項目(Tr, COD, T-NおよびT-P)についてPCAを行った。得られた結果を**表4**に示した。

Z(1)は原データの約55%を説明している。Z(1)は, SQRT Trの因子負荷量のみが負であり、他はすべて正なので、前述と同じように汚濁の指標成分と考えられた。

Z(2)はWTとLnCODの因子負荷量が同符号であり、温度に関する指標成分と考えられた。

表4 伊勢湾内での時間項目を含まない水質主成分分析結果

(Sample Number 1327)

| | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnTN | LnTP |
|-----------|------|---------|-------|--------|-------|
| Average | 18.2 | 1.70 | 0.959 | -0.792 | -3.19 |
| U.E.V.*1 | 40.9 | 0.192 | 0.156 | 0.443 | 0.45 |
| St.Dev.*2 | 6.40 | 0.439 | 0.395 | 0.666 | 0.67 |

*1 U.E.V.: Unbiased Estimate of Variance

*2 St.Dev.: Staderd Deviation

Correlation Matrix

| | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnTN | LnTP |
|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| WT | 1 | -0.401 | 0.478 | 0.249 | 0.409 |
| SQRT Tr | -0.401 | 1 | -0.454 | -0.489 | -0.429 |
| LnCOD | 0.478 | -0.454 | 1 | 0.321 | 0.383 |
| LnTN | 0.249 | -0.489 | 0.321 | 1 | 0.688 |
| LnTP | 0.409 | -0.429 | 0.383 | 0.688 | 1 |

Factor Loadings

| | Z(1) | Z(2) | Z(3) | Z(4) | Z(5) | Cont.Rate |
|-----------------|--------|--------|---------|---------|---------|-----------|
| WT | 0.668 | -0.525 | 0.404 | -0.315 | -0.127 | 1 |
| SQRT Tr | -0.754 | 0.044 | 0.546 | 0.346 | -0.110 | 1 |
| LnCOD | 0.702 | -0.454 | -0.1614 | 0.525 | -0.0118 | 1 |
| LnTN | 0.759 | 0.544 | 0.000 | 0.0585 | -0.352 | 1 |
| LnTP | 0.803 | 0.360 | 0.317 | 0.07230 | 0.345 | 1 |
| Eigen Value | 2.73 | 0.909 | 0.588 | 0.503 | 0.272 | |
| Cont.Rate*1 | 54.6 | 18.2 | 11.8 | 10.1 | 5.44 | |
| Acc.Cont.Rate*2 | 54.6 | 72.7 | 84.5 | 94.6 | 100 | |

*1 Cont.Rate: Contribution Rate(%)

*2 Acc.Cont.Rate: Accumulation Contribution Rate(%)

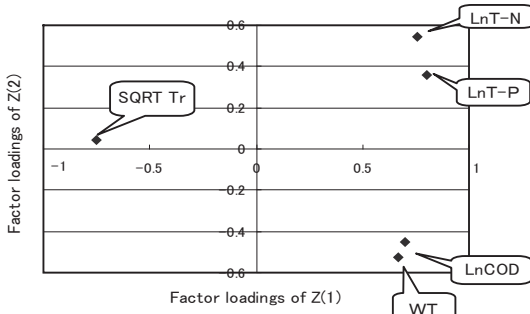


図5 第1主成分Z(1)と第2主成分Z(2)の因子負荷量散布図

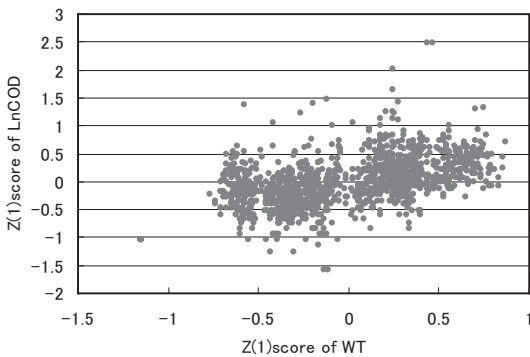


図6 水温のZ(1)スコアとLnCODのZ(1)スコアとの関係

因子負荷量散布図(図5)からデータは3種類のグループ①:SQRT Tr, ②:WTおよびLnCOD, ③:富栄養物質(LnT-NおよびLnT-P))に区分された。

ここで、TrはWT, 有機汚濁の指標であるCODおよび富栄養の指標であるT-NおよびT-Pの影響を受けると予想できる¹¹⁾。これらの各水質項目の関係性を考察する場合、各水質項目の特徴を総合的に表わしているZ(1)軸での各水質項目個々のZ(1)スコアを算出し、相関性を考察した。すなわち、PCAを行うことによりZ(1)軸で原データ集団の分散が最大となり、原データ集団の特徴を把握しやすくなる。また、PCA結果でLnT-NとLnT-Pは相関が高く因子負荷量散布図(図5)において同一グループなので、富栄養の指標はLnT-Nで代表させることとした。

ここで、 $f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots)$ がn個の独立変数 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots$ の関数であれば、その全微分dfは偏微分 $(\partial f / \partial X_i)X_1, X_2, \dots$ と独立変数

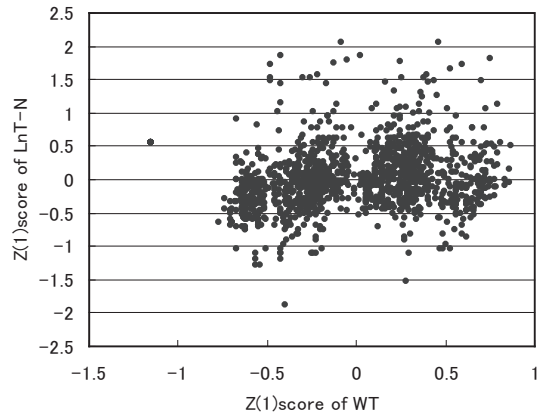


図7 水温のZ(1)スコアとLnT-NのZ(1)スコアとの関係

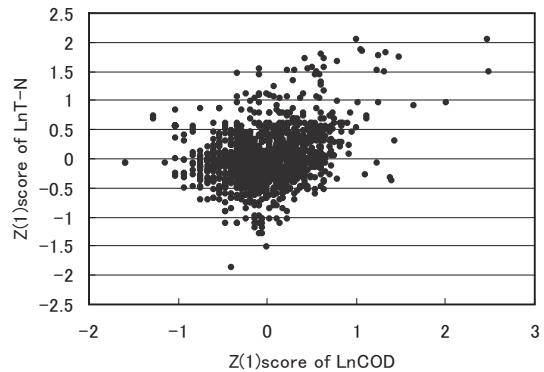


図8 LnCODのZ(1)スコアとLnT-NのZ(1)スコアとの関係

の微分 $dX_1, dX_2, \dots, dX_i, \dots$ によって次のように定義される²¹⁾。

$$df = \sum \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right) X_1, X_2, \dots, dX_i \quad (1)$$

Z(1)における各水質項目のスコアにおいて、WT, LnCODおよびLnT-Nはそれぞれ相関は低く、互いに独立と見なす(図6~8)。

$SQRT Tr \equiv f(WT, LnCOD, LnT-N)$ と定義した場合、SQRT Trの微小変化は、(1)式より、

$$\begin{aligned} \Delta SQRT Tr = & \Delta WT \times \left(\frac{\partial f}{\partial WT} \right)_{(LnT-N)(LnCOD)} + \\ & \Delta LnCOD \times \left(\frac{\partial f}{\partial LnCOD} \right)_{(WT)(LnT-N)} + \\ & \Delta LnT-N \times \left(\frac{\partial f}{\partial LnT-N} \right)_{(LnCOD)(WT)} \end{aligned}$$

と表現できる。

ここで、

$$\left(\frac{\partial f}{\partial WT}\right)_{(\text{LnT-N})(\text{LnCOD})}$$

は関数 $f(\text{WT}, \text{LnCOD}, \text{LnT-N}) = \text{SQRT Tr}$ の LnT-N 値と LnCOD 値を固定した場合の、 WT と SQRT Tr の関係を表わす二次元曲線の接線の傾きである。他の偏微分項も同様のことを表わしている。

今回、接線の傾きを次のように求めた。各項目のデータ群の微小変化領域を考える。固定する2つの変数(項目)のうち一つの変数についてのヒストグラムを細かい区分で描いて、もっとも高頻度の区分でのデータ集団を抽出し、当該集団において、続いて残りの固定する変数で同様にデータ集団を抽出した。次に固定する変数の順番を入れ替えて同様にデータ集団を抽出した。この2つのデータ集団を合わせて散布図を描き「回帰直線の傾き」を求めた。この傾きを原データ集団の「接線の傾き」と見なした。

第1主成分スコアにおいて、 LnT-N 値と LnCOD 値を固定した場合の、 WT と SQRT Tr の関係図を **図9** に示した。同様に、 LnCOD と SQRT Tr の関係図を **図10** に示した。 LnT-N と SQRT Tr の関係図を **図11** に示した。なお、**図12** に対応する原データでの T-N と Tr の関係図を示した。

各関係図からそれぞれの直線回帰式の傾きを求め、近似的に

$$\left(\frac{\partial f}{\partial WT}\right)_{(\text{LnT-N})(\text{LnCOD})} = 0.003 \text{ (図9参照)}$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \text{LnCOD}}\right)_{(\text{WT})(\text{LnT-N})} = 0.2 \text{ (図10参照)}$$

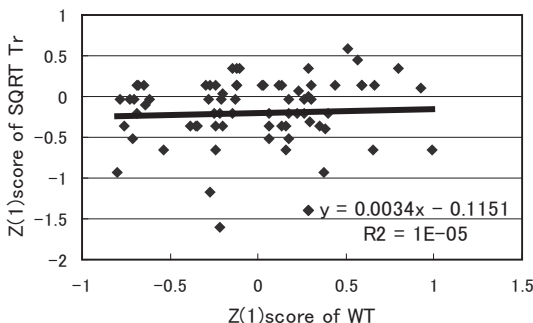


図9 水温の Z(1)スコアと SQRT Tr の Z(1)スコアとの関係

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \text{LnT-N}}\right)_{(\text{WT})(\text{LnCOD})} = 0.8 \text{ (図11参照)}$$

と見なすと、

$$\Delta \text{SQRT Tr} = 0.003\Delta \text{WT} + 0.2\Delta \text{LnCOD} + 0.8\Delta \text{LnT-N}$$

となる。

各変数(各項目)は第1主成分のスコア値であ

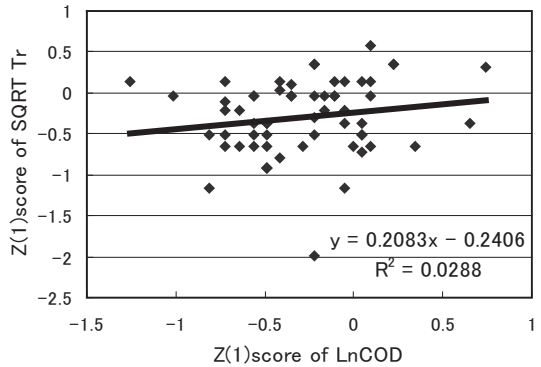


図10 LnCOD の Z(1)スコアと SQRT Tr の Z(1)スコアとの関係

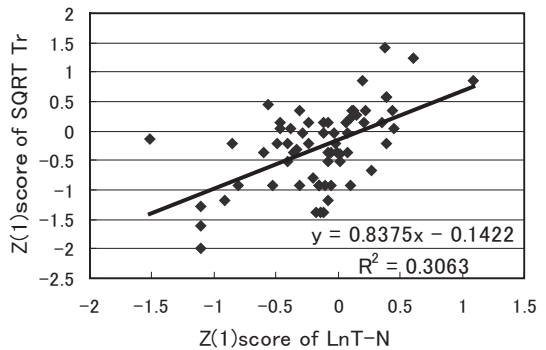


図11 LnT-N の Z(1)スコアと SQRT Tr の Z(1)スコアとの関係

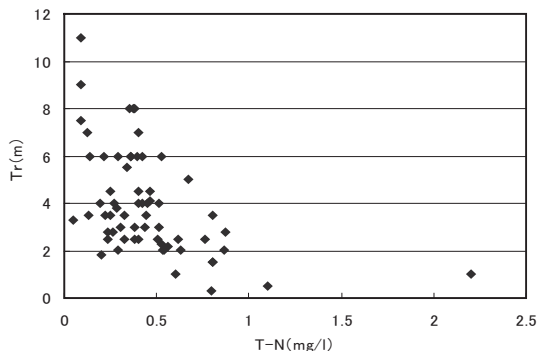


図12 T-N と透明度との関係

表5 WT, SQRT Tr, LnCODおよびLnT-NのZ(1)スコアの最大値と最小値

| | Z(1)score | | | |
|---------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | WT | SQRT Tr | LnCOD | LnT-N |
| maximum | 1.03 | 1.55 | 3.03 | 2.04 |
| minimum | -0.913 | -2.00 | -1.93 | -1.66 |
| average | -6.67E-16 | -7.53E-15 | 1.24E-15 | -3.88E-16 |

り、その各変数の数値範囲は表5に示した最大値、最小値の間である。

したがって、Trの変化については、この20年間ではT-Nの変化、すなわち、富栄養化物質濃度の変化ともっとも関係が強いことが示唆された。このことは、藤田ら²²⁾が伊勢湾浅海定線の観測点におけるTrは主にプランクトンの増減を反映していることから考えると、三重県の伊勢湾沿岸海域におけるプランクトンの発生と富栄養化物質濃度が強く関係していることが再認識された。

ここで、T-Nの代わりにT-Pを用いて同様の検討を行うと、T-PはT-NほどTrと関係性が強くないことが示された(図13)。この結果は、岩崎ら²³⁾の報告による伊勢湾における植物プランクトン量と窒素量にリンよりも顕著な正の相関関係が認められることとも符号した。したがって、伊勢湾でTrに影響を与えているプランクトンは窒素の方がリンよりも成長の律則因子となっている可能性が示唆された。

一方、伊勢湾においては、植物プランクトンの生産に直接的に関与するのは微量元素である鉄であるとされている²⁴⁾が、武田²⁵⁾の硝酸塩を窒素源として利用する植物プランクトンの「鉄欠乏ストレスの影響は細胞のC:N比の変化にあまり現われないことを考慮すると、鉄欠乏状態にある植物プランクトンは、硝酸塩利用効率の低下による窒素制限を受けているというよりも、むしろ光合成の明反応の阻害による影響を強く受けて、エネルギー制限状態にあるものと思われる」との報告もあることから、結果的に窒素量の多寡がTrと関係付けられたと考えられる。

第1主成分は汚濁の指標と考えられるので、Trにおいてもスコア値が高ければ水質が汚れている評価になる。したがって、図10から分かるように、スコア値においてTrとT-Nは正の相関が

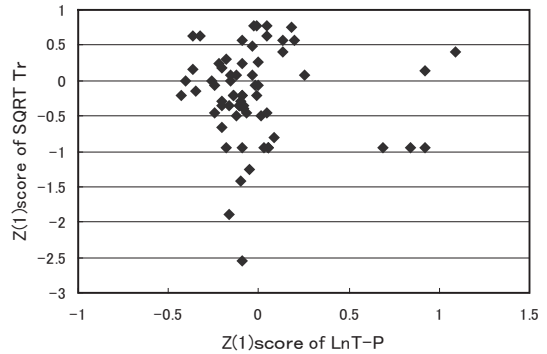


図13 LnT-PのZ(1)スコアとSQRT TrのZ(1)スコアとの関係

ある。スコア値から生データに変換してみると、TrとT-Nは負の相関がある。また、WTの変化は見かけ上、Trの変化にはほとんど影響していないことが示唆された。

これらのことから、現時点で伊勢湾内の三重県沿岸海域でのTrに関し、過去20年間の海水温変化の影響はほとんどなく、Trを改善しようとする場合、富栄養化物質、とくに窒素量を削減することが有効であると思われる。

4. ま と め

三重県沿岸域(伊勢湾内部、湾口部、湾外部)の海水について、水質汚濁防止法に基づく公共用水域常時監視データを用いてWT, Tr, COD, T-NおよびT-Pの長期スパン(1989~2008年度;20年間)での変化を、PCAを用いて検討し、次の結果を得た。

- 1) 三重県沿岸の水質特性は、伊勢湾内部、湾口部および湾外部の3つの分類に大別されることが示唆された。
- 2) 測定データ数の多い伊勢湾内部沿岸海域についてPCAを実施した結果、WTは経年的に上昇傾向にあり、それに伴いCODも微増傾向であることが示された。一方、T-Nは経年的に低下傾向であった。
- 3) 環境省が海域の新たな環境基準項目として導入を検討しているTrと他の水質項目との関係を伊勢湾内部について検討したところ、Trの変化をWTの変化、CODの変化およびT-Nの変化で表わすとした場合、Trの変化

とT-Nの変化の相関がもっとも強いことが示唆された。T-PではT-Nほどの相関性は認められなかった。このことから、現在の伊勢湾内部においてTrを改善するためには窒素を削減することが有効であると分かった。

伊勢湾においてはCOD経時変化が横ばいか上昇傾向にある。一方、陸域からのCOD供給は総量規制実施により削減されている。湾内のTrは上述の結果から改善傾向にあり、すなわちプランクトンは減少傾向と考えられる。したがって、伊勢湾におけるCOD経時変化が横ばいか上昇傾向である原因を、内部生産のうち植物プランクトンの増加に求めることはできない。

今後は、長期的・継続的に蓄積したデータを用いてCODの経時変化について検討したい。

—参考文献—

- 1) 花木啓祐：地球温暖化問題を考慮した水環境管理。水環境学会誌，**29**，57-61，2006
- 2) 山田哲也，織田まゆみ，高島京子：地球温暖化がもたらす徳島県の水質について。徳島県保健環境センター年報，No27，39-43，2009
- 3) 香川の環境，<http://www.pref.kagawa.lg.jp/kankyo/chikyu/ondanka/index.htm> (2010. 12. 時点)
- 4) 倉賀野 連，榎田貴郁，栗原幸雄，桜井敏之；歴史的データを用いた日本近海の海面水温の長期的変化傾向の把握。測候時報，74巻特別号，S19-S31，2007
- 5) 第1章 地球温暖化に関する海洋の長期的変化，日本近海の海面水温，2010/07/16，http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/sougou/pdf/S04_1.1.2.pdf (2010. 12. 時点)
- 6) 中敷憲和，坪野考樹，丸山康樹；温暖化予測と日本周辺の海洋環境変化。沿岸海洋研究，**42**，103-109，2005
- 7) 須藤隆一：地方環境研究所は今。資源環境対策，**46** (11)，26-28，2010
- 8) 森田昌敏：地方環境研究所における調査・測定分野の現状と課題。資源環境対策，**46** (11)，38-41，2010
- 9) 環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室：地方試験研究機関のあり方。資源環境対策，**46** (11)，29-33，2010
- 10) 岩本真二：地方環境研究所の現状と今後。資源環境対策，**46** (11)，34-37，2010
- 11) 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に関する懇談会：閉鎖性海域中長期ビジョン，86pp.，2010，http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=15178&hou_id=12192 (2010. 12. 時点)
- 12) 今後の閉鎖性海域対策に対する懇談会：今後の閉鎖性海域対策を検討する上での論点整理，31pp.，2007，http://www.env.go.jp/water/heisa/pdf/ronten_seiri-full.pdf#search=閉鎖性海域論点整理 (2010. 12. 時点)
- 13) 三重県：公共用水域及び地下水の水質測定結果，1989～2008，三重県環境森林部 水質改善室，三重県津市。
- 14) 環境省：水質汚濁に係る環境基準について，昭和46年12月28日環境庁告示第59号，<http://www.env.go.jp/kijun/mizu.html> (2010. 12. 時点)
- 15) 石田秀人：考える統計学，351pp.，工学社，東京，2008
- 16) 青木繁伸：主成分分析，<http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/stats-by-excel/vba/html/pca.html> (2010. 12. 時点)。
- 17) 尖度，<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%96%E5%BA%A6> (2010. 12. 時点)
- 18) 鳥原誠，永井里央，宮ノ原陽子，坂元克行，長井一文：鹿児島湾近海の水質特性。鹿児島県環境保健センター所報，第10号，97-101，2009
- 19) 関根義彦，川股信一，佐藤裕一：初冬期における伊勢湾フロントの観測。沿岸海洋研究ノート，29，190-196，1992
- 20) 三重県：平成21(2009)年版 環境白書。<http://www.eco.pref.mie.jp/policy/hakusho/h21/index.htm> (2010. 10. 時点)
- 21) W. J. MOORE，藤代亮一：ムーア物理化学—上—，第4版，p45-46，東京化学同人，東京，1975
- 22) 藤田弘一，水野知巳，久野正博，中村元彦：伊勢湾における中・長期的な透明度の変動と漁業生産。水産海洋研究，**73**，217-218，2009
- 23) 岩崎英雄，岩佐清和，阿弥一起，矢島勉：伊勢湾の海洋環境特性と赤潮。三重大学水産学部研究報告，9号，57-67，1982
- 24) 中川喜明，内田郁夫，伊藤裕康，大熊和行，清水千秋，前川徳昭：伊勢湾における赤潮に関する研究(その2) —伊勢湾における無機微量成分(鉄・マンガン)—。三重県環境科学センター研究報告，第5号，11-15，1984
- 25) 武田重信：鉄供給による植物プランクトンの栄養塩利用の制御。Bull. Plankton. Soc. Japan，**49**，21-26，2002