	<h2 style="margin: 0;">宍道湖の水質浄化のミステリー</h2> <p style="margin: 0;">—平成 24 年 9 月の塩水濃度異常は 80 年に 1 度の出来事だった—</p> <p style="margin: 0;">SCE・Net 西村 二郎</p>	<p style="margin: 0;"><b>R-45</b></p> <p style="margin: 0;">発効日</p> <p style="margin: 0;"><b>2015/</b></p> <p style="margin: 0;"><b>12/11</b></p>
---	---	---

### 1. まえがき

松江大橋から眺める宍道湖の夕日は逸品だ。その美しい湖にアオコが繁茂するようになり、憂慮していた。平成 24 年 8～10 月がピークだった。10 月、筆者が帰松したときには、市中心の大橋川までアオコが押し寄せてきていた。この惨状は国際観光都市・松江にとって大問題である。翌 25 年の 6 月の臨時県議会では、発生するアオコの回収費用が計上されたほどである。

宍道湖の水質悪化と連動するかのようになり、名物・シジミの漁獲量も減り続けていた。平成 23 年には、シジミ漁獲量日本一の座を青森県の十三湖に明け渡した。

ところが、平成 25、26、27 年とアオコの発生が激減したのである。シジミの漁獲量も、まだ低レベルながら、顕著に回復し、26 年度には日本一の座を奪還した(図 1 参照)。

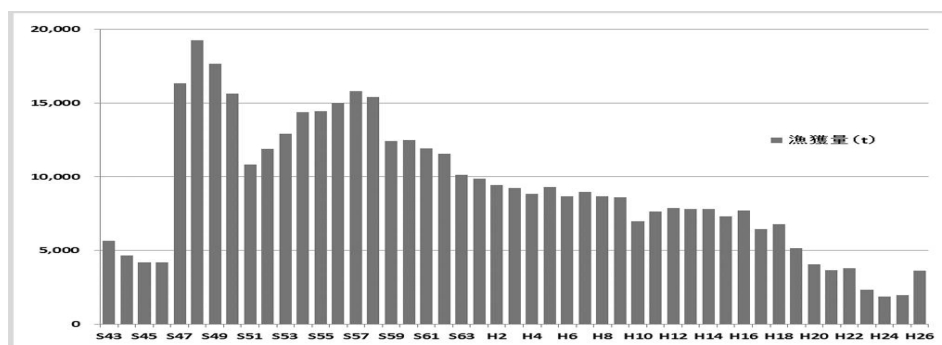


図 1 宍道湖におけるシジミ漁獲量の推移

喜ばしいことだが、原因不明のままでは将来につながらない。そこで、水質データ等を眺めながら理由を推測してみた。国交省出雲河川事務所のデータベースは行き届いている。

本題に入る前にクイズを考えてみよう：水槽に栄養分をたっぷりと含む水を入れた。放置しておけばアオコが繁茂する。お金を掛けずにアオコが生えないような水にするにはどうするか。季節は夏。頭を抱えているうちに水面は真っ青になった。その状態を見れば誰も思い付く。そう、アオコを除去するのだ。残された水はきれいになる。

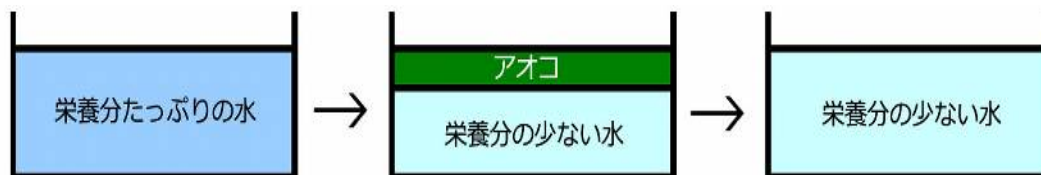


図 1 水槽の水浄化(思考実験)

これと同じようなことが 24 年 10 月を中心に、宍道湖で起きていたのである。8、9、10 月と湖底付近の塩水濃度が高まり、9 月には 80 年に 1 度の高まりとなっていた。神の国・出雲では神在月。全国から集まった神々の御配慮であろう。

ここで、本文に出てくる水質管理上のパラメーターを下表にまとめておく。

表 2 水質管理指標

記号	単位	説明
COD	mg/l	化学的酸素必要量(分解するのに必要な酸素要求量):水質汚濁の結果を表している。この場合は、有機物系の汚濁を考えているのだから本来、BOD(生物化学的酸素必要量)が用いられるべきだが通常は分析が容易なCODで代用される。
TN	mg/l	全窒素:窒素は植物性プランクトン等の栄養分であり水質汚濁の原因物質である。TNには結果物質からの寄与も含まれるが便宜的に代用されている。
TP	mg/l	全リン:以下TNの項に準じる。
DO	mg/l	溶存酸素

### 1. 宍道湖の概要

宍道湖は図2のように中海という汽水湖を介して日本海に繋がっている汽水湖である。

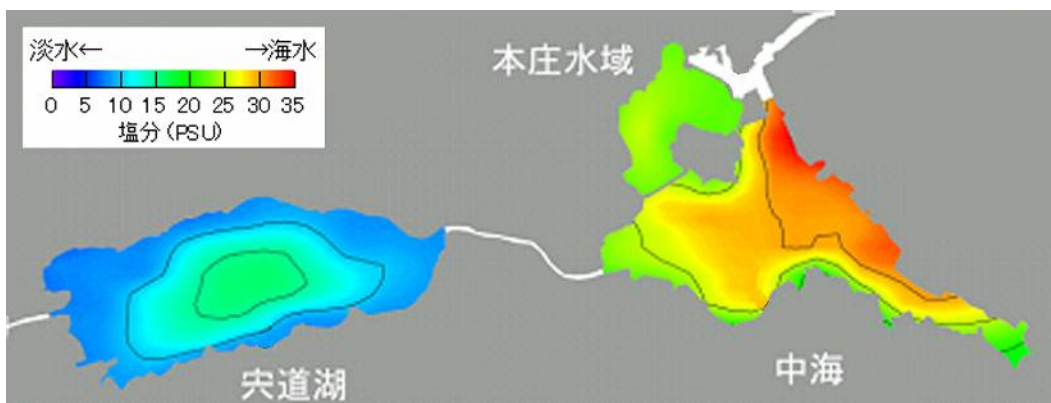


図2 斐伊川→宍道湖→大橋川→中海→境水道→日本海(出典:出雲河川事務所)

宍道湖に関する諸元は表1のとおりである。宍道湖をB5版のプリント用紙の大きさまで縮尺すれば、水深(平均)は紙の厚み程度である。マテバラをとるときの参考にすべきだ。

表1 宍道湖の諸元

	面積	直接流入域	水深(平均)	水深(最大)
宍道湖	81.8 km <sup>2</sup>	400 km <sup>2</sup>	4.5 m	6.4 m

宍道湖の水収支およびリン収支は、汽水湖汚濁メカニズム解明調査ワーキンググループの報告書(2014年8月)(以下、「報告書」と略記する)によれば、図3のようにになっている。これらの値は20年間の平均値である。「報告書」では中海からの逆流の寄与(満潮時など)をカウントし、さらに湖底からのリンの浮上が差し引き、28t/年あると見積もっている。

「報告書」では中小河川の寄与について定かでないので、この推算値の定量性には疑問があるが定性的には正しい。湖底を綺麗にしてリンの浮上を抑えることには、一時的にアオコを防止する効果がある。ただし、覆砂には賛成しない。

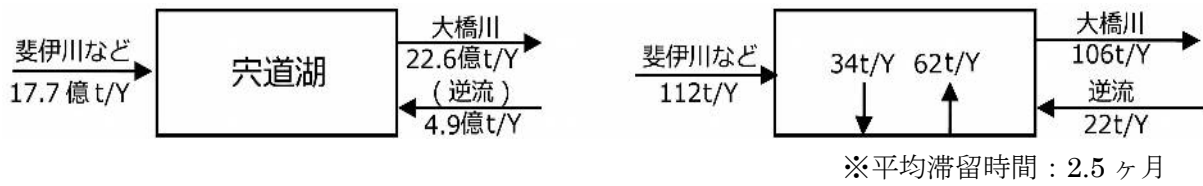


図3 宍道湖の水収支とリン収支

窒素収支ではなくリン収支を取るの、窒素は外乱が大き過ぎて水質管理の指標として使えない(大気汚染のため、通常、雨水中のTN>湖水のTN、となっている)からであろう。

## 2. 平成24年に宍道湖で起きたこと

図4は主要な湖のTPの年次推移である。宍道湖の平成24年のTP異常が際立っている。

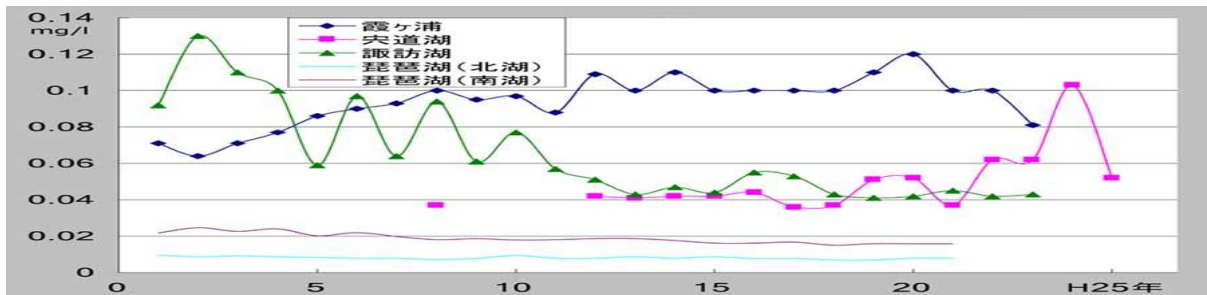


図4 主要な湖のTPの推移(年次)

図5は宍道湖のCOD、TN、TPの月次推移である。

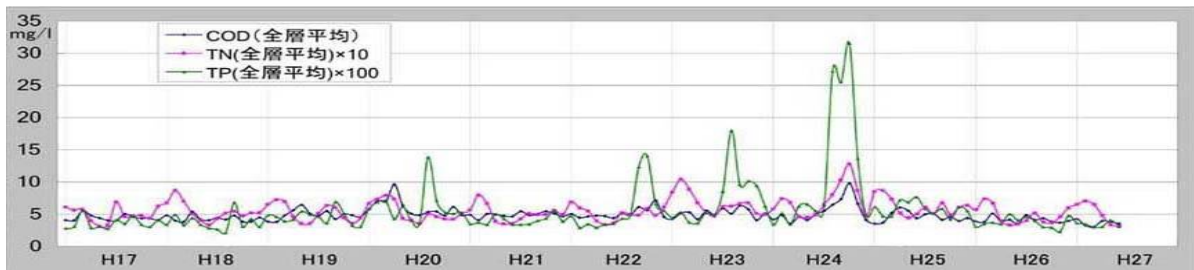


図5 COD、TN、TPの推移

TPにはときどき異常が見られる。とくにH24年の8~10月のTP異常は顕著である。そしてCODやTNを随伴していないので、汚染水の流入でないことが判る。このような異常現象が宍道湖以外の湖沼で経験されたことがあるのだろうか？

次にCl濃度(上層、下層)の推移を示す(図6参照)。

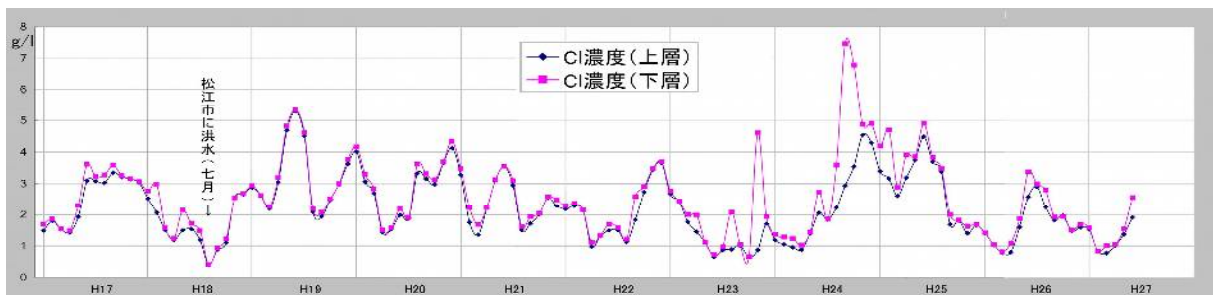


図6 Cl濃度(下層)の推移(月次)

上下層差はあまりない。差がある場合は淀みがひどかったのか、測定日(逆流してからの

経過日数)によるものと推察される。

Cl 濃度(下層)の 126 ヶ月の平均値( $\bar{x}$ )は 2.51g/l。普遍分散の平方根( $\sigma$ )は 1.246。この間の最大値( $x_m$ )は 7.47(H24 年・9 月)であった。したがって、 $(x_m - \bar{x})/\sigma = 3.98$ となる。つまり、H24 年 9 月の Cl 濃度は 4 シグマの異常値だったのである。この分布が正規分布に従うとすれば、 $x_m > 7.47$ である確率( $p$ )は $3.45 \times 10^{-5}$ である。ここで、9 月の異常値は月間平均値ではなく、9 月の然るべき日の測定値であることに注意したい。

このようなことが  $n$  回目のサンプリング時に起きる確率は  $p(1-p)^{n-1}$  であり、次に起きるまでの期間は、 $T = \sum_{1}^{\infty} np(1-p)^{n-1} = 1/p$ 、となる。この式に  $p = 3.45 \times 10^{-5}$  を代入し、日に年に換算すれば、79.4 年となる。H24 年 9 月のような Cl 濃度の高まりは滅多に起きることではないことが判る。数値が余りにも大きいので、納得できない方には、 $p = 0.5$  の場合を考えて頂きたい。同じ計算式を用いて次に起きるまでの期間は 2 回目となる。

では、何故このようなことが起きたのか。雨が降らなければ宍道湖は淀む。そこへ中海から満潮時などに塩水濃度の高い水が逆流してくる。比重が大きいから底の方に回り込む。そのことを検証するために Cl 濃度と松江市への降雨量との関係を調べてみた(図 7 参照)。逆相関は認められるが、定量性は弱い。この理由は松江市への降雨量が宍道湖への流入量を代表していないことによるものと考えられる。

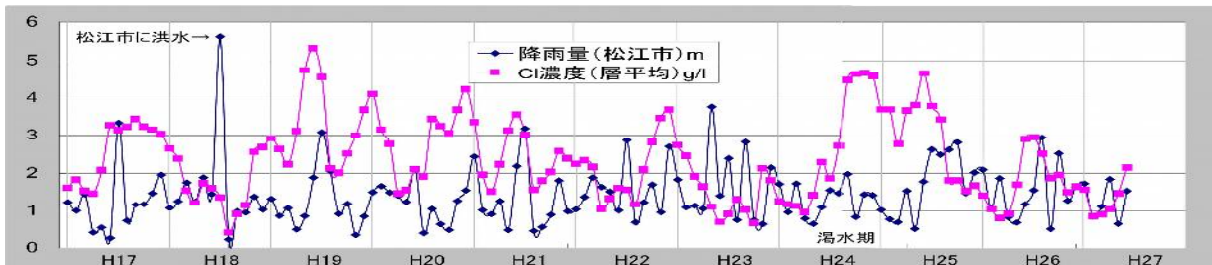


図 7 松江市への降雨量と Cl 濃度(層平均)の推移

溶存酸素は図 8 のように概ね鋸刃状に推移している。水温が高くなる時期、湖底のへドロ中に存在する有機物の分解に消費されていると考えられる。

Cl 濃度(下層)が高い場合、有機物の分解によって生成した水溶性リンは、比重差が大きいので速やかに浮上する。反応生成物が系外に去れば分解反応は速く進む。その証拠が同時期、殆どゼロとなった溶存酸素(下層)に現れている。

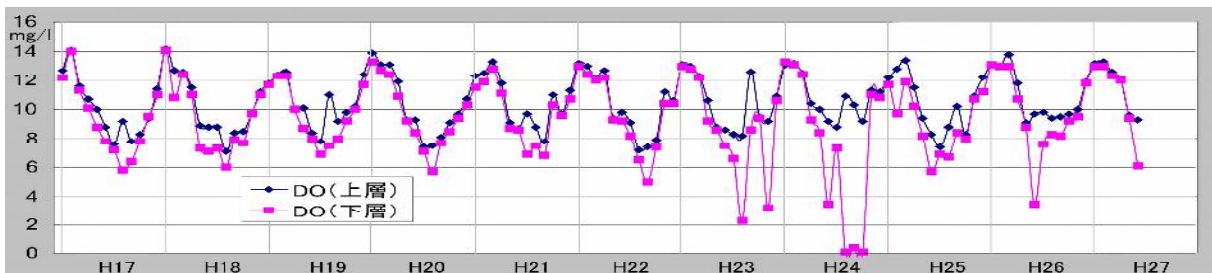


図 8 溶存酸素(上層、下層)の推移



分解反応によって生成する水溶性リンの量はTPの量を殆どをカバーしている(図9参照)。水溶性リンは沈降することなく大橋川を経て中海に流出する。なお、有機物が分解すれば窒素分も発生するが、図5のTNはあまり大きくなっていない。ガス化したのであろう。

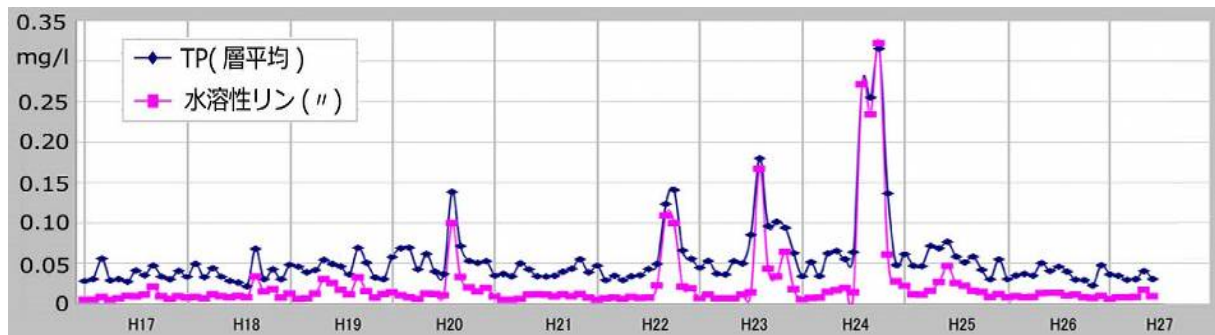


図9 水溶性リン(層平均)とTP(層平均)の推移

H24年10月に湖水中に存在していたリンは116トン(TP=0.315mg/l および宍道湖の容積を用いて計算)であった。TP異常が落ち着いた26年度は年平均で、13.6トン(TP=0.037mg/l)であった。この間、差し引き約103トンものリンが流出し、湖底を綺麗にしたのである。なおアオコ状態で流出するリンはカウントされていない。

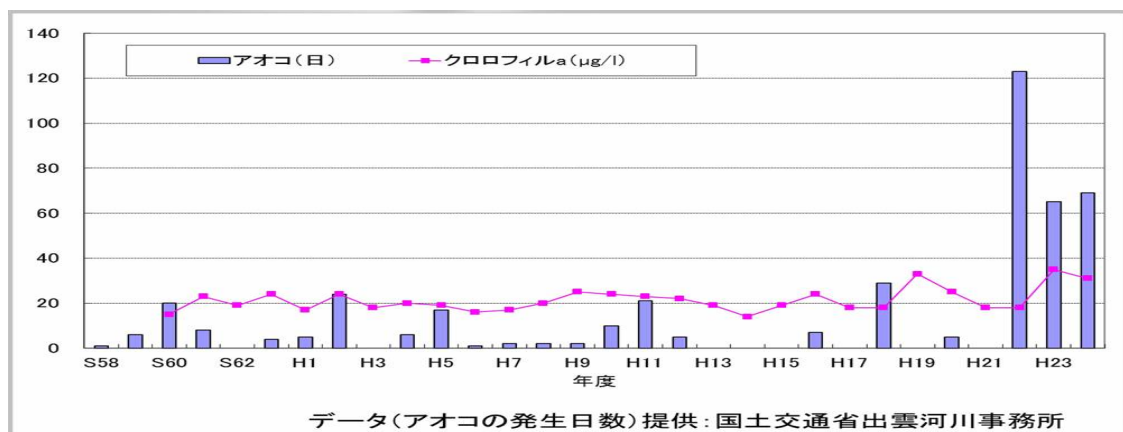


図10 アオコ発生日数の推移

宍道湖におけるアオコ発生状況は図10のようになっている。アオコ発生の深刻さから言えば、平成24年度が最悪だが、発生日数で言えば22年が最悪となる。25年以降はプロットされていないが殆ど発生していない。また、本来密接な相関があるべきクロロフィルaとの相関が見られないのは、湖心には通常、アオコが存在しないためであろう。存在しても、水質サンプルは水面下50cmのところから採ることになっているので引っかからない。

アオコはH25年激減した。前半は、塩水濃度の高まりにより、湖水が淡水性のアオコの生育に不適な環境になった、と考えられる。しかし、塩水濃度が平年並になった後も続いている。何故だろう？

アオコには、適切な窒素/リンの領域があると言われている(図11参照)。閾値があるのだ。昭和61年、霞ヶ浦でアオコが消えたのは窒素が多くなり過ぎたためと言われている。H12年、諏訪湖では夏になってもアオコが出現しなかった。水質が良くなったためである。H25年後半以降、宍道湖でアオコ発生が殆ど見られなくなったのも水質が良くなったためと考えられる。これは、水質が悪化して再び閾値を越えるまでは続くものと考えられる。

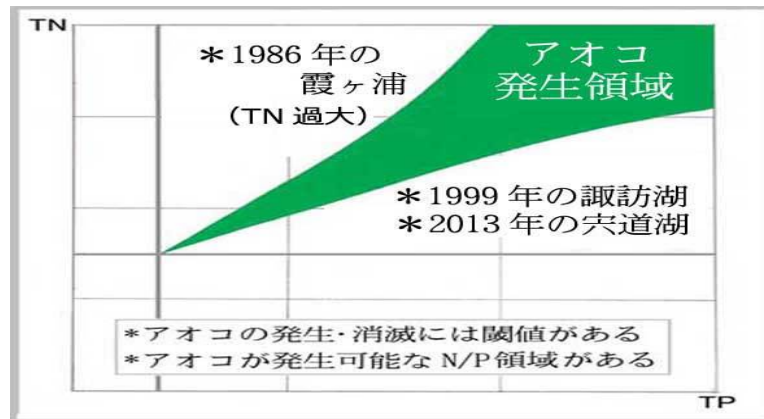


図 11 アオコの発生領域(イメージ)

アオコが消えてから、シジミの漁獲量が増え始めた。H24年の2,200トンに対して26年は3,500トンまで回復している。アオコとの因果関係は必ずしも明らかではないが、アオコは枯れて湖底に沈降して腐敗しヘドロ化する。その分解に湖底付近の溶存酸素が消費されることは確かである。富栄養化自体は植物性プランクトンにとって望ましい。エサが増えるので、シジミにとっても良いはずだ。しかし、アオコが発生するようになるとヘドロが大幅に増え、湖底が貧酸素状態になる機会が増える。

#### 4. 再びアオコの湖としないために

水質浄化の王道は発生源対策である。項目は定性的にはすでに明らかになっている。一般的に言われているのは、農村起因の肥料・農薬および家畜の糞尿と大雨のとき市街地から流れてくる汚水だ。寄与の度合いを知るには測定が必要だが、原因究明と並行して対策を講ずべきである。

琵琶湖木浜地区で実施されていると言われている農業用水閉ループ化は参考になるはずだ。日本では家畜の糞尿処理が義務付けられているとのことであるが、米国やオーストラリア同様、地下浸透方式が可能な地域があるのではなかろうか。不十分でも実行可能な改善の策を採用しないと結果としてより悪い事態を招くのは良くあるケースだ。

市街地を流れる川の汚染源は、その気になれば、比較的容易に特定できるに違いない。非常識な漏洩を正すだけでもかなり改善されるのではなかろうか。

環境工学関係者は原因追究だけでなく対策にも力を入れて欲しい。原因究明と対策、車の両輪が揃ってこそ工学として完結する。

以上