

第2章 汽水湖の特徴

「汽水」とは、海水と淡水の中間の塩分を持つ水のことをいい、その水を湛えている湖沼を「汽水湖」という。日本には面積 4km²以上の湖沼（ダム湖含まず）が 53 湖沼^{※1}あり、その約 1/3 の 18 湖沼が前述「1.2 本資料で取り扱う日本の汽水湖」で挙げた汽水湖に該当する。代表的なものとしては、サロマ湖や能取湖、風蓮湖、網走湖、厚岸湖、小川原湖、十三湖、涸沼、浜名湖、三方五湖、湖山池、東郷池、中海、宍道湖などがある。

※1：国立天文台編(2013)「平成 25 年版理科年表」丸善(株), PP606.

2.1 汽水湖の特徴

汽水湖の特徴は、流域の最下流に位置することから有機物や栄養塩類など様々な物質が集積する一方、外海との自由なつながりをもち、そのため潮汐の影響を受けて外海との物質交換が行われていることが挙げられる。微細な懸濁物質は、遡上する海水に含まれる陽イオンと接することにより凝集・沈殿して湖底に蓄積する。一方、下層の密度が塩分により大きくなっているため、塩分成層界面に残りやすい面もあるほか、塩水遡上の先端近くに高濁度水塊 (*Estuarine Turbidity Maximum*) が形成される特徴がある。

有機物や栄養塩類等が集積することは、汽水湖の生物生産性が高くなる要因の一つになるが、湖内の富栄養化を促進するとともに、下層では蓄積された有機物等が分解されるに伴って酸素が消費される。また硫酸イオンは海水中に含まれているため、淡水湖より還元化に伴う硫化水素の発生が見られやすくなる可能性が高い傾向にある。

汽水湖において海水の遡上は、水の交換を促進するため、湖内の水質が希釈等により良くなる面がある。その反面、海水遡上は汽水湖における成層の形成に大きく左右するように湖沼環境への重大な影響要因の一つとなっている。塩分を含む海水は淡水に比べて重く、塩分の違いによる水の密度差は水温の違いによるものと比べて大きい^{※2}。このことから、遡上する塩水が汽水湖の下に潜り込んで形成される塩分成層の密度勾配は、淡水湖で見られる水温成層よりはるかに強い。

※2:例えば、20℃の水においては塩分差 1‰(塩化物イオンで約 550mg/L)の密度差が約 4.5℃の水温差に相当する。

塩分成層が形成されている場合、鉛直方向の混合が少なく、底層は酸素が供給されず貧酸素化し、湖底から硫化水素の発生や栄養塩等の溶出が見られやすく、そのような状況が水生生物への影響や富栄養化（植物プランクトンの異常増殖）の促進などをもたらし、汽水湖の問題点の一つになっている。硫化水素や栄養塩類等を多く含む下層の水塊が強風などの外力により上層へ湧昇されると青潮の発生などにより、湖内の水質や生物に大きな影響を及ぼすこととなる。

汽水湖の塩分は不規則に変動し、移動性の低い底生動物等はそれに対応して浸透圧を調節せざるを得なくなる。そのような環境に適合する種類は淡水域や海域と比べて少ない。しかし、そのように塩分に適合した生物にとっては、種間の競争が激しくなく、さらに陸域からの多くの有機物や栄養塩類が流入することにより、多量に生息・生育しやすくなる（生産性が高い）。また移動性の高い魚類等は、塩分に応じて汽水湖に特有な種に加え、海産種あるいは淡水産種で構成されて変化に富む。さらにはそのような魚類や潜水性カモ類などの鳥類等は、豊富にある餌資源（移動性の低い二枚貝や植物プランクトン、底生動物など）を捕食することができる。

一方、汽水湖は、流域の最下流（人口が集中する平野部）に位置することから、人間活動の最も活発な場所にあるという立地条件にある。このため、汽水湖では漁業、港湾、観光・レクリエーションなどの場として活用される反面、都市開発や農業開発に伴う地形改変なども行われてきた。

2.2 汽水湖の水理・水質特性

2.2.1 成層とそれに伴う現象

[1] 成層という現象

湖沼では、上下層間の密度差が大きいと、鉛直混合が制限され水塊が二層に分離するようになり、これを「成層」という（図 2.2.1-1）。上下層間の密度差は水温や塩分などの違いにより生じ、塩分の違いによるものを塩分成層という。このため、下層には高密度水（高塩分、あるいは低水温の重い水）、上層には低密度水（低塩分、あるいは高水温の軽い水）に区分される。特に塩分の違いによる密度差は水温によるものよりはるかに大きい（前項「2.1 汽水湖の特徴」の※2の例示を参照）。

このように、汽水湖では塩分の影響により、淡水湖と比べて上下層の密度差が大きくなり、成層が強固に形成されやすくなる。

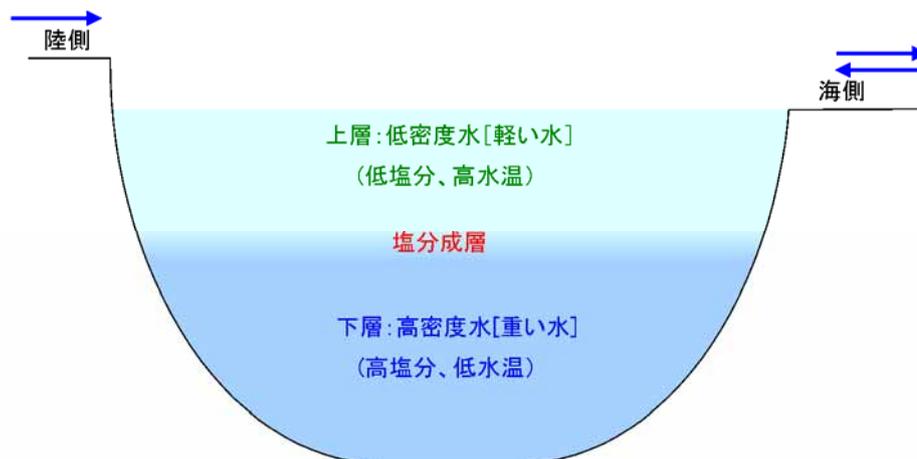


図 2.2.1-1 汽水湖の成層のイメージ

[2] 淡水湖における成層の特徴との違い

日本の淡水湖の場合、その多くで春季～秋季において上層水温が高くなることから、鉛直方向の水温変化が見られ、下層に密度の大きい冷水（重い）、上層に密度の小さい温水（軽い）が分布するという水温による成層（水温成層）が生じる。そのような湖沼では秋季以降に気温の低下に伴って上層水温が低くなって上下層の水温差が小さくなり、上下層の対流混合が見られるようになって循環期を迎える。また、上層水温が冬季に 4℃以下になる湖沼では、上層の密度が小さくなる（軽くなる）ため※1、夏季のほかに冬季にも成層し、春季と秋季の2回で循環している。

※1：水の密度（重さ）は、水温の違いで見ると 4℃のときが最も大きく（重く）なる。これより高く又は低くなると密度（重さ）が小さく（軽く）なる。

一方、汽水湖は流域から密度の小さい（軽い）淡水が流入するとともに、外海から密度の大きい（重い）塩水が遡上する。このとき、湖の地形や潮位差など流入する塩水の状況によって変わってくるが、塩分が高く密度の大きい（重い）水は下層に潜り込み、塩分が低く密度の小さい（軽い）水が上層に分布するという塩分成層が生じやすい。

塩分により成層した上下層の密度差は水温によるものより大きくなることから、汽水湖では淡水湖よりも強固に成層するものが多い。また塩分は水温と比べて季節変化が小さいことから、成層が長く続く汽水湖もある。例えば、網走湖等のようにほぼ通年で成層している部分循環湖も見られる（後述の図 2.2.1-2 参照）。

ただし、汽水湖の中には、地形や塩分の状況に応じ、風や洪水、潮汐等の影響^{※2}により年に1回以上混合する汽水湖（涸沼や東郷池など）もあれば、鉾崎池^{※3}などのように塩水供給が少ないために成層しにくい汽水湖もある。

※2：後述「2.2.3 湖内の流動特性 [1]湖内の流動とその要因の関係」を参照。

※3：鉾崎池は、海鼠池や貝池と比べて外海と湖沼を隔てている礫洲の礫間が小さいため、外海との水交換が行われにくいことから海水が入りにくい状況にあり、強固な成層が形成されにくい。

*松山通郎(1987.10)「海に抱かれる三つの湖沼－上甕島の池沼」日本の湖沼と溪谷 12 ぎょうせい, PP53～58.

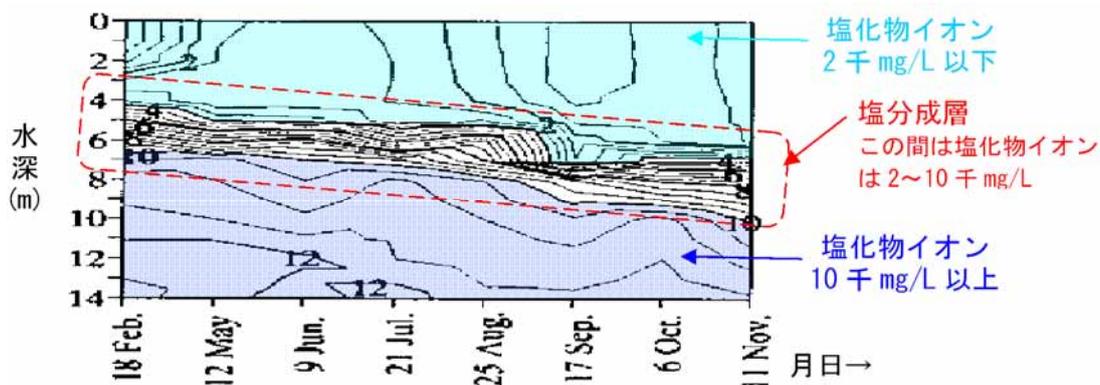
[3] 成層に伴う現象

湖沼の成層は底層の貧酸素化やそれに伴ういくつかの現象（詳細は後述「3.1.3 汽水湖水質の課題」を参照）が生じる要因になる。

成層している底層は、酸素が供給されない中で有機物の分解過程による酸素消費が行われるので、水中の溶存酸素量(DO)が減少し、ときには無酸素状態になることがある。そのように底層が貧酸素化すると、湖底堆積物から硫化水素発生、栄養塩類（リン）や重金属類（鉄、マンガン等）の溶出が促進され、それらが底層へ高濃度で蓄積されやすくなる。

図 2. 2. 1-2 は網走湖の塩分、溶存酸素量(DO)の鉛直分布を時系列で示したものである。網走湖では塩分により通年で成層しており、それに伴って底層が貧酸素化している。

◇塩化物イオン[単位：千 mg/L]



◇溶存酸素量(DO) [単位：mg/L]

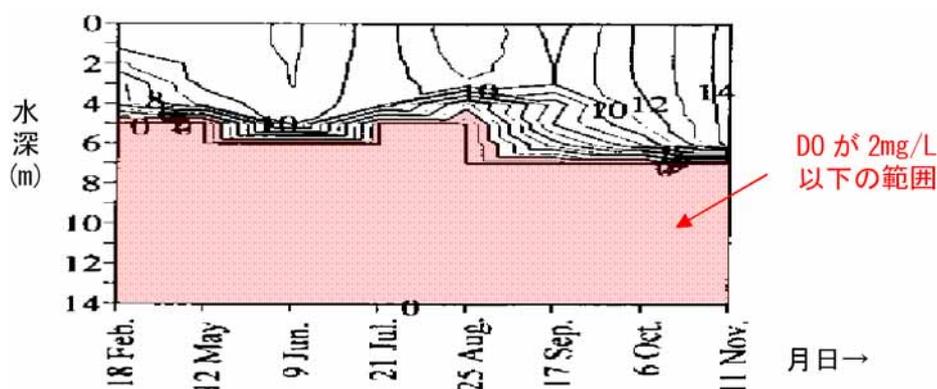


図 2. 2. 1-2 網走湖の塩化物イオン、溶存酸素量(DO)の時系列鉛直分布(1992年)

※三上英敏(2000)「網走湖の陸水学的特徴と長期的環境変化」高村典子編, 湖沼環境の変遷と保全に向けた展望, 国立環境研究所研究報告 第 153 号, 環境庁国立環境研究所, PP5-33.

2.2.2 汽水湖の混合様式

[1] 汽水湖の混合様式

汽水湖で生じる現象の把握や対策時の留意点などは、各湖の混合様式（混合のしやすさ）に応じて異なることが想定されるため、その混合様式に着目した整理が優先的な検討事項の一つとなる。

ここでいう汽水湖の混合様式区分とは、次の観点から「部分循環湖」、「完全循環湖」の区分をいう。「部分循環湖」、「完全循環湖」で見られる現象例について、表 2.2.2-1 に示す。

◇部分循環湖	： 通年でほとんど混合しない汽水湖
◇完全循環湖	： 通年で1回以上混合する汽水湖

表 2.2.2-1 「部分循環湖」、「完全循環湖」の汽水湖で見られる現象例

混合様式	現象の例	該当汽水湖(例)
部分循環湖	<ul style="list-style-type: none"> ◇底層の貧酸素化が<u>ほぼ通年</u>で見られる。このため、硫化水素発生等も<u>ほぼ通年</u>で生じるおそれがある。 ◇風により青潮^{*1}が発生する。このとき、低酸素・高硫化水素の底層水塊は上層と混ざらず湧昇するので、風上側における水生生物へ大きな影響を及ぼす(斃死等)。 ◇塩淡境界面の位置が浅くなっていると、青潮の発生、硫化水素や栄養塩類等の上層への回帰が生じやすい。 	網走湖、水月湖など
完全循環湖	<ul style="list-style-type: none"> ◇底層の貧酸素化が<u>成層形成時</u>で見られる。このため、硫化水素発生等も<u>成層形成時</u>に生じるおそれがある。 ◇風等により上下層が混合されると、硫化水素や栄養塩類等が上層へ回帰する。この結果、水生生物の生息場縮減や植物プランクトン増殖等の影響をもたらすおそれがある。 ※青潮は部分循環湖と比べて生じにくい。ただし、ときには青潮が発生して水生生物へ大きな影響(斃死等)を与えることもある^{*2}。 ◇上下層で混合するため、<u>上層塩分は比較的变化しやすい</u>。このことから、(特に移動性の低い)水生生物にとって塩分変化に応じた浸透圧調節が必要であるため生息状況に影響を及ぼしやすい。 	サロマ湖、涸沼、東郷池、宍道湖など

※1: 青潮とは、強風が一定時間連続して吹いた場合に風下に湖水が吹き寄せられ、風上側に溶存酸素量(DO)に乏しく硫化水素等を多く含む下層の水塊が上昇するものであり、魚類の斃死等の被害をもたらすことから、汽水湖の問題の一つになっている(後述の「2.2.3」、「3.1.3」参照)。

※2: 宍道湖では、平成24年9月に青潮が発生して魚類の斃死が見られた(後述の「3.1.3」参照)。

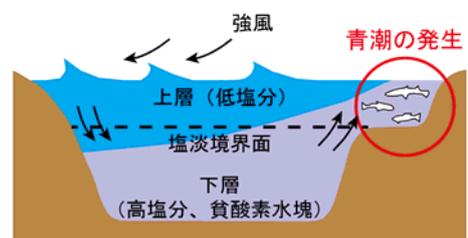


図 2.2.2-1 青潮発生のイメージ

[2] 汽水湖の混合様式の検討方法について

汽水湖の混合様式については、湖沼の地形（形状、面積・水深・幅など）や湖内の成層状況（上下層の密度差）、風や洪水等の外力などに左右される（後述「2.2.3 湖内の流動特性」、図 2.2.2-2を参照）。

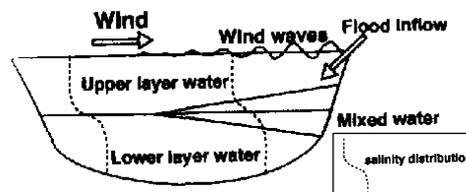


図 2.2.2-2 洪水や風による湖内の模式イメージ図※1

※1: 奥田節夫(1997)「汽水湖における水塊の移動と混合過程」日本海洋学会, 沿岸海岸研究 第35巻 第1号, PP5~13.

一般的に混合状況を示す指標としては、リチャードソン数 (*Richardson number*) がある。リチャードソン数とは、成層流の力学的安定度を表す指標であり、浮力（分子）と慣性力（分母）の比を表す無次元量である。すなわち安定（成層）しようとする浮力よりも分母の混合しようとする攪拌による慣性力が大きくなると、成層が破壊されて混合し、このようにときリチャードソン数は小さくなる。

$$\text{リチャードソン数 } Ri = \frac{g \times (\partial \rho / \partial z)}{\rho \times (\partial u / \partial z)^2}$$

分子：浮力、重力による安定度
分母：外力によるせん断力又は攪乱の強度

g : 重力加速度、 ρ : 密度、 z : 鉛直座標（深さ）、
 u : 水平的な流れ、 $\partial u / \partial z$: 鉛直方向の速度勾配

リチャードソン数は簡易に算出しにくい面がある一方、外力の一つである風に応じる混合状況を判断する簡易な指標として、リチャードソン数を修正したウェダバーン数 (*Wedderburn number*) がある。ウェダバーン数は、湖沼の地形や湖内の上下層の密度差を勘案しつつ、外力となる風によるパラメータを用いて混合の有無を判断する手法の一つである。ここでは混合様式を把握するための目安となるウェダバーン数を紹介し、ウェダバーン数に着目した混合様式の検討方法（算出方法とその使い方）をとりまとめた。

(1) ウェダバーン数の算出方法

ウェダバーン数は、風による湖沼の混合に関する無次元化されたパラメータである※2。鉛直循環流や下層水の湧昇特性を表すことを目的として使用される。

※2: Alexander J. Horne, Charles Remington Goldman, *Limnology*, McGraw-Hill, 1994.

ウェダバーン数 W は、季節といった長期ではなく日といった短期間での表水層の混合について説明する。 $W=0.01 \sim 1.0$ といった低い値の場合、不安定な状態、つまり混合が起こりやすいことを表し、 $W=1 \sim 15$ といった大きな値の場合、安定状態を表す。ここでは $W > 1$ が混合しない、 $W < 1$ が混合すると判断する。

ウェダバーン数Wの算出式は、次のとおりである。式の分子が“深さにもとづいた浮力”を、分母が“長さにもとづいた風による混合”という概念をもつ。このため、“長さにもとづいた風による混合”の度合いが“深さにもとづいた浮力”を上回る(W<1)と湖内が混合するが、“風による混合”の度合いが小さければ(W>1)湖内が混合するまでに至らないことになる。すなわち、湖内を混合させる外力(風)が強ければ混合しやすくなり、そのときはウェダバーン数Wの分母が大きくなるのでW<1となる。

ウェダバーン数: $W = \frac{g'h^2}{u_*^2 L}$ <1>式

分子: 浮力、重力による安定度
分母: 風によるせん断力又は攪乱の強度

ここで、修正重力加速度: g' (成層を越えての密度変化によって減少した重力加速度)

$$(g' = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1 g)$$

貯水池深さ: h

風速による摩擦速度: u_*

貯水池長さ: L (風が吹く方向の貯水池の長さ)

ウェダバーン数の算出にあたっては、まず風速による摩擦速度 u_* を算定する必要がある。有田(2003)^{※3}によると、風速による摩擦速度 u_* については、せん断応力に着目すると、次の関係が成立していることから、この考え方を参考にする。

※3: 有田正光(2003)「水圏の環境」東京電気大学出版局, PP240~241.

$$\tau_0 = \tau_a = \rho_a u_{a*}^2 = \rho_1 u_*^2 = \rho_a C_D U_z^2$$

$$\Leftrightarrow u_*^2 = \rho_a C_D U_z^2 / \rho_1 \quad \dots \dots \dots <2>式$$

ここで、 τ_0 : 風によって水面下に作用する水中せん断応力

τ_a : 風によって水面上に作用する空気側のせん断応力

ρ_a : 空気の密度 ($\approx 0.00118\text{g/cm}^3$)

ρ_1 : 上層水の密度

u_* : 水面下の摩擦速度

u_{a*} : 水面上の摩擦速度

U_z : 水面から高さ z (m) の風速(一般に $z = 10$ (m))

C_D : 抵抗係数

ただし、道奥^{※4}によると上記<2>式の抵抗係数 C_D は、簡便な方法として次の Deacon と Webb により提案された次式<3>^{※5} から算出する方法があると述べられている。

$$C_D = (1.0 + 0.07 U_{10}) \times 10^{-3} \quad \dots \dots \dots \text{<3>式}$$

ここで、 U_{10} : 水面から高さ 10(m) の風速

※4: 道奥康治「陸水環境論－水温成層と熱循環が水質に及ぼす影響－」
(<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-c3labo/gyoumu.htm>)

※5: Deacon, E. L. and Webb, E. K. : Interchange of properties between sea and air, Ch. 3, Small-scale interaction in the sea, ed. by M. B. Hill, Interscience, Newyork, pp. 43-87, 1962.

ここでは抵抗係数 C_D 、風速によるせん断速度 u_* について、上式<3>を用いて算出する。また、ウェダバーン数の上記<1>式における修正重力加速度 g 、貯水池深さ h 、貯水池長さ L については、次のとおり仮定して算出する。

◇修正重力加速度 g' については、上下層の密度差を考慮して次式から算出する。

$$g' = \{(\rho_2 - \rho_1) / \rho_2\} \times g$$

ここで、 ρ_1 : 上層の密度、 ρ_2 : 下層の密度、 g : 重力加速度

このとき、密度は上層及び下層の塩分実測値に基づき算定する。

◇貯水池深さ h は、上下層の混合状況を把握するために、湖の最大水深を対象とする。

◇貯水池長さ L は、風が最も多く吹く方向(卓越風向)における湖面上の吹送距離を対象とする。

例えば、ウェダバーン数を算出するときに必要な上層下層の塩分が月 1 回測定されている場合、風ウェダバーン数は概ね月毎で算出する。このとき、貯水池長さ L は対象月の卓越風向を対象にして算出する。ここでは、その方向における湖心を通る湖面の直線距離を設定する。

◇風速については、対象月における最大風速^{※6} の最大値を設定する。

※6: ここでいう“最大風速”とは 10 分間の平均風速の最大値を示したものであり、気象庁データを用いる。

なお算出にあたって、上下層の塩分調査結果を用いることにより算出式(前述の<1>式)中の密度差 g' (修正重力加速度)を算出することができる。ただしウェダバーン数は、外力によって混合する・しないを把握する指標であるため、このときの風の外力の設定は、その調査日より後のものを使用する必要がある(図 2.2.2-3)。

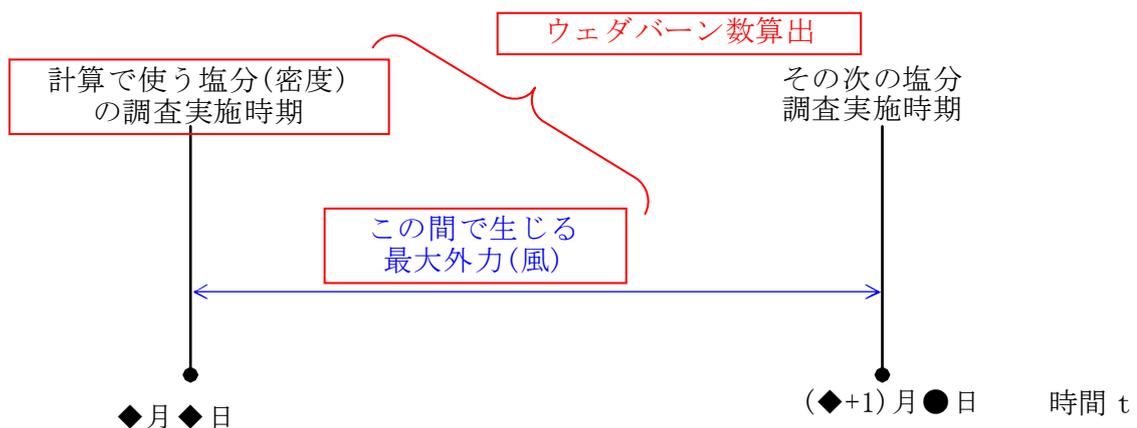


図 2.2.2-3 算出するときに使う上下層の塩分差(密度差)のデータ採取時期と
外力(風)の時期の関係イメージ
(月 1 回の塩分測定が行われている場合のイメージ例)

(2) ウェダバーン数の使い方

ウェダバーン数については、1 より大きければ「混合していない」、1 より小さければ「混合している」という目安になる。また風の要素をパラメータとすることから、ウェダバーン数を混合様式の指標の一つにすると、その汽水湖においては、どのくらいの風が吹けば混合するのか・しないのかを概略的に把握することができる。また、時期別にウェダバーン数を見ることにより、いつ頃、混合するのか・しないのかも概略的に把握することができる。

例えば、図 2.2.2-4(1)は、涸沼において試算したウェダバーン数とその算出時に用いた風速(最大風速)の関係を整理したものである。この図を見ると、風速が概ね 9m/s 以上の場合は、ウェダバーン数が 1 より小さくなる傾向にあることから、湖内が混合される可能性が高いと考えられる。

図 2.2.2-4(2)は宍道湖におけるウェダバーン数について、風速を 10m/s、5m/s と仮定した場合の試算結果例である。このように、宍道湖では、風速が 10m/s 程度になるとウェダバーン数が 1 より小さくなり、混合しやすくなることが予想できる。

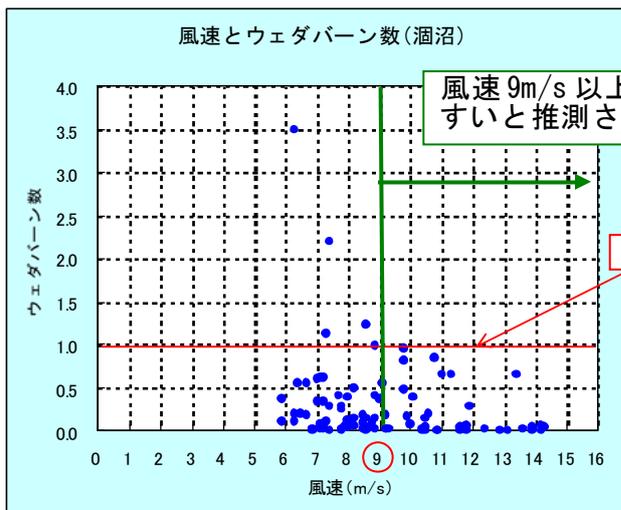


図 2.2.2-4(1)

ウェダバーン数の試算結果と風速

※湖沼を対象に平成 17 年 6 月～23 年 3 月の期間でウェダバーン数を試算した。このとき密度差は湖中央の水質定期調査結果、風速は水戸気象観測台の観測結果を用いた。

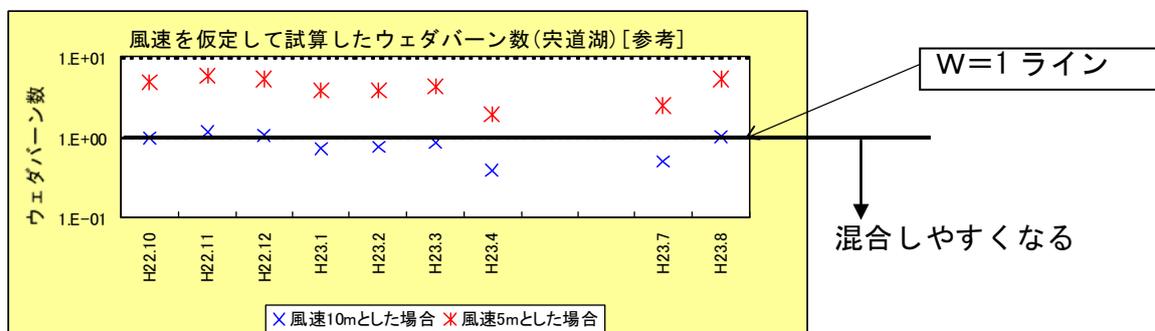


図 2.2.2-4(2) 風速を 10m/s、5m/s と仮定した場合のウェダバーン数の算定結果

※宍道湖を対象に平成 22 年 10 月～23 年 8 月の期間でウェダバーン数を試算した。このとき密度差は湖中央の水質調査結果（環境省で測定）を用いた。

またウェダバーン数は、青潮発生などの指標の一つとして活用すること（塩淡境界面の勾配から見て判断する材料として）が期待できる。青潮は風に伴って塩淡境界面が上昇して生じるものであり、混合しようとする過程で生じるものと考えられる。すなわち、塩淡境界面上昇によりウェダバーン数が小さくなって 1 になろうとする途中（例えば 10 くらいになったときなど）で青潮が生じそうな状況になることが考えられることから、その青潮が発生しそうなときのウェダバーン数がどの程度のものであるか、そのときの風速がどのくらいかを把握しておくことにより、青潮発生の目安になる可能性が考えられる。

須藤ら(2011)^{*1}は、能取湖を例として青潮が発生しそうな状況のウェダバーン数を調査している。能取湖では青潮が発生する直前に強い南北方向の風が生じ、ウェダバーン数(図 2.2.2-5 中の We 数)が低下していた。このことから、能取湖においては We 数が 10 以下になると青潮発生の懸念があると指摘している。なお、このときのウェダバーン数は、水深 19m で算出している（能取湖の最大水深は 21.2m）。

そのような目安を個々の汽水湖で検討し、青潮発生等の状況を概略的に捉えることが期待できる。

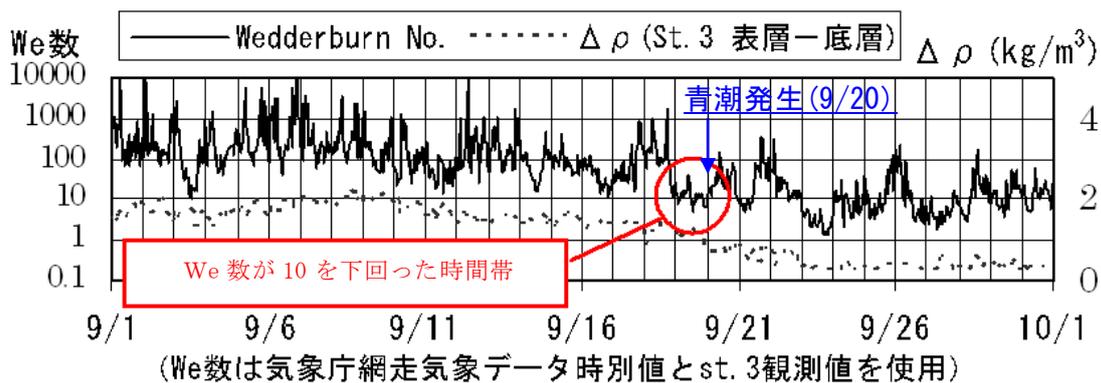


図 2.2.2-5 青潮現象発生前後のウェダバーン数(能取湖の例※1)

※1：須藤賢哉, 大橋正臣, 山本潤(2011)「水産水域環境の諸問題に対応した水質変動予測手法について」平成 23 年度 北海道開発技術研究発表会, 国土交通省北海道開発局

※2：能取湖における青潮現象が生じた平成 20 年 9 月 20 日前後のウェダバーン数(We 数)を算出している。

以上より、汽水湖の塩分調節を行いアオコ等の水質対策を図る場合など、ウェダバーン数を用いることによって、その塩分変動（密度差の変動）に伴う混合様式の変化を概略的に把握することが可能になると考えられるとともに、そのような概略的な検討は重要である。

またウェダバーン数は、混合状況やさらには成層に伴う水質現象を捉える指標として、下記の判定に応用できることが期待される。

- *どのくらいの風が吹けば、混合するのか・しないのか。
 - *いつ頃、混合するのか・しないのか。
 - *その対象湖沼でウェダバーン数がどのくらいのときに(風向・風速がどのようなときに)底層の貧酸素化や青潮などが生じるのか。
 - * (例えば塩分調節などを行う場合)塩分が変化することによって、混合するようになるのか・しないようになるのか。
- など

＜コラム 2＞洪水による汽水湖への外力の影響

洪水は湖沼環境に大きく作用する外力の一つとなることから、汽水湖の環境形成過程を把握するための重要な要素の一つとして洪水の状況を捉えておく必要がある。

図 C2-1 は網走湖における流域からの流入量と塩水層厚を示したものである。網走湖の場合、混合することがほとんどない部分循環湖であるため、図 C2-1 でも完全混合している状況にはない。

しかし融雪出水が生じているときに塩水層厚が小さくなっていることが伺える。このことから出水が湖内流動に外力として働いたことにより成層強度が弱化している可能性が想定される。

図 C2-2 は森脇ら(2003)^{※1}により調査された中海における平成 12 年度の塩分 3 区分の水塊と貧酸素水塊(溶存酸素量 3mg/L 未満)の容量を月別に整理したものであり、図 C2-3 は平成 12 年 9 月前半の松江と出雲における降水量を示す。

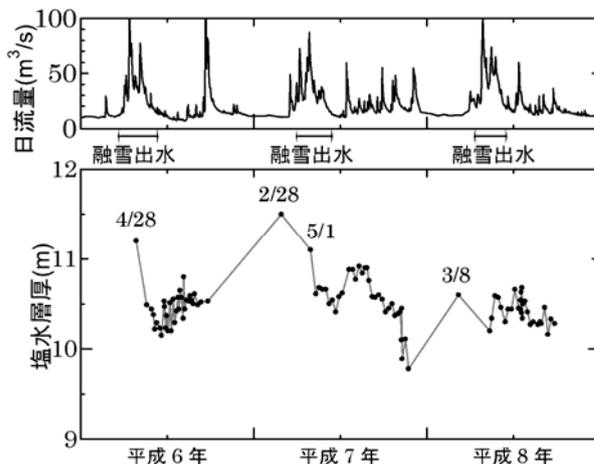


図 C2-1 網走川の日流量と網走湖下層の塩水層厚の経時変化
 ※湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-31.

図 C2-2 を見ると、9 月に塩分 25PSU 以上の水塊と貧酸素水塊の容量が小さくなっている。この理由について森脇ら(2003)^{※1}は、9 月前半の秋雨前線に伴う大量の降雨により、中海容量の約 75~80%相当(大雑把な推算であるが)の流量が流入したこと挙げている。

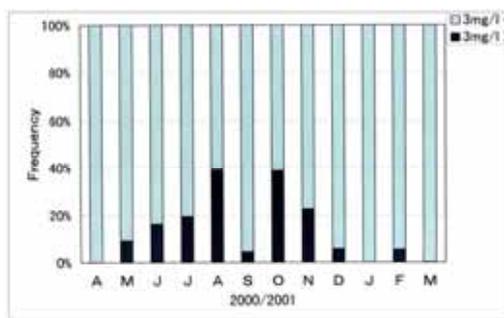
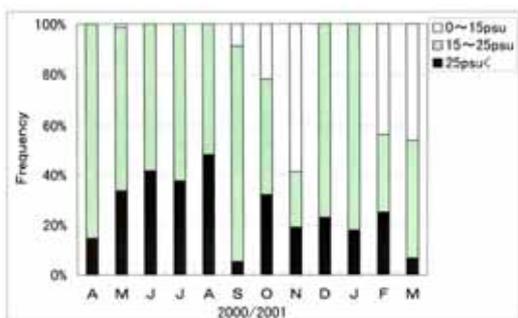


図 C2-2(1) 塩分 3 区分の水塊容量比(中海)^{※1} 図 C2-2(2) 貧酸素水塊容量比(中海)^{※1}

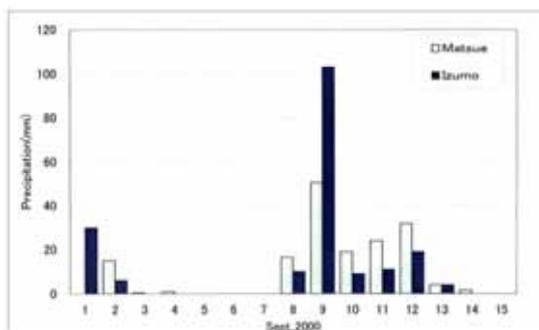


図 C2-3 松江、出雲の降水量^{※1}
 (平成 12 年 9 月前半)

※1: 森脇晋平, 大北晋也(2003)「中海に出現する貧酸素水塊の海況学的特性と海洋構造」島根大学汽水水域研究センター, LAGUNA(汽水域研究) 10, PP27-34.

図 C2-4 は、大規模な洪水前後における宍道湖湖心上下層の塩化物イオンと斐伊川（灘分地点）の流量の経時変化の例を整理したものである。

これらを見ると、洪水ピーク時には上下層の塩化物イオンは差がなくなっており混合している状態にあるが、洪水ピーク後を見ると上層の塩化物イオンが大きく低下しており、下層よりも低くなって差が生じており、洪水が上層に流入していることが伺える。ただし平成 15 年～24 年の中で最大規模の洪水であった平成 18 年（図 C2-4 の上段）では流量が大きいことにより下層の塩化物イオンも低下しており、成層強度が弱化的な可能性があるが想定される。

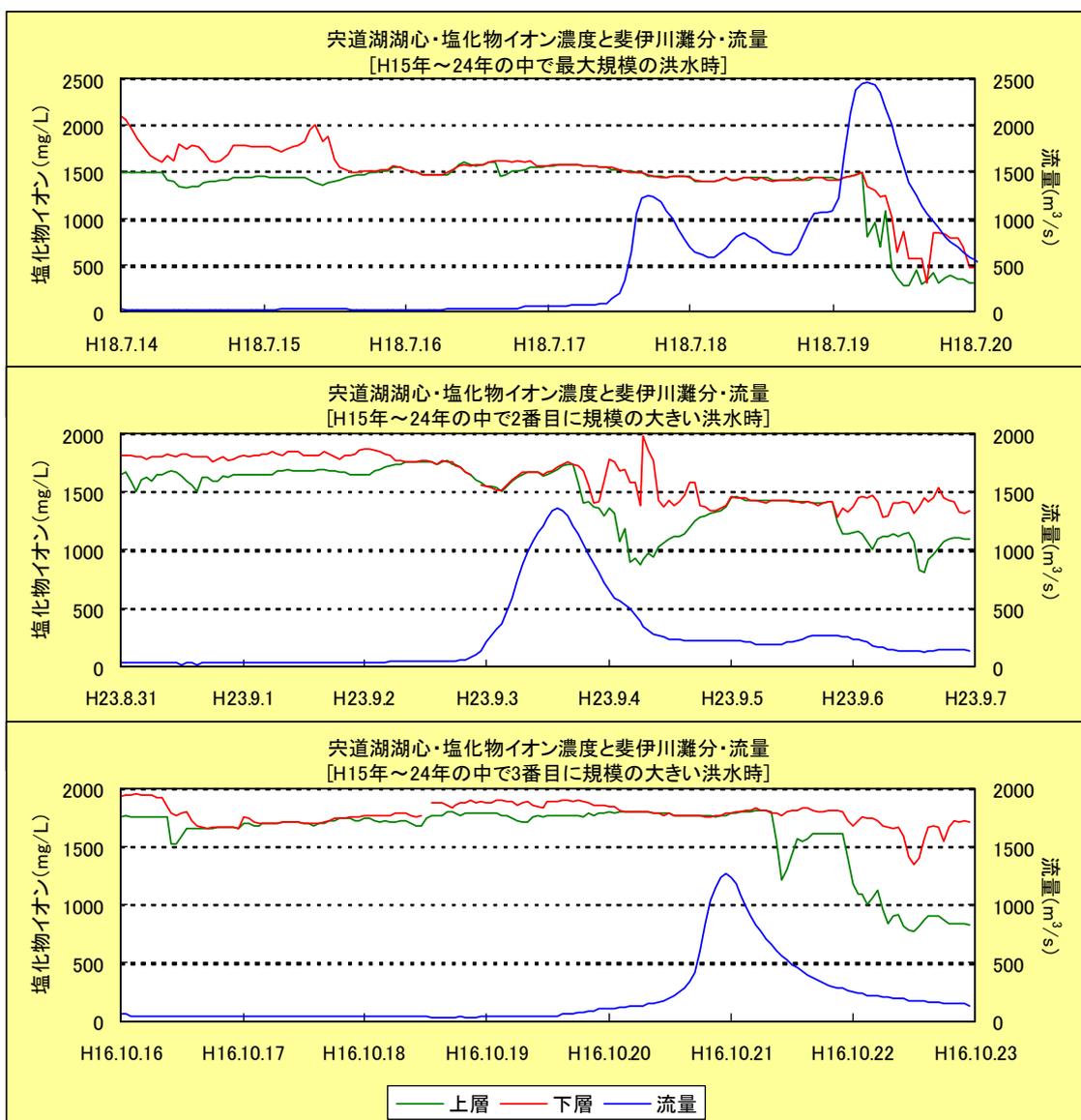


図 C2-4 宍道湖湖心上下層の塩化物イオンと斐伊川（灘分地点）の流量の経時変化（大規模な洪水前後の例）

※国土交通省「水文水質データベース」(<http://www1.river.go.jp/>)のデータより整理

<コラム 3> ウェダバーン数と貧酸素化

汽水湖での貧酸素化は、塩分上昇に伴って成層状態が強化されていることにより底層への酸素供給が減少していることによる影響が大きいと考えられる（山室ら, 2011）^{※1}。

そこで前述のウェダバーン数と溶存酸素量（DO）の関係を整理した。

ウェダバーン数については、網走湖、小川原湖、涸沼、湖山池、東郷池、宍道湖を対象に水質定期調査結果を勘案して月毎に算出した。図 C3-1 は溶存酸素量（DO）の年最小値とそのときのウェダバーン数の関係を整理したものである。なお表 C3-1 は検討に用いたデータの概要である。

図 C3-1 を見ると、ウェダバーン数が1以下の分布（図中赤丸で囲っているプロット）ではバラツキが見られるものの、ウェダバーン数が大きくなると溶存酸素量（DO）が低下する右下がりの傾向が見られていることから、底層 DO(年最小値)はウェダバーン数、すなわち混合様式に左右されていることが想定される。

このことから底層 DO を検討する際には、検討対象とする汽水湖の混合様式に着目することが重要である。このためには、混合様式を左右する塩分の鉛直分布を、少なくとも上下2層以上で適切に測定する必要があり、その塩分の状況を踏まえてウェダバーン数などを用いて検討対象の汽水湖の混合様式を捉え、底層の貧酸素化に係る検討を行うことが重要であると考えられる。

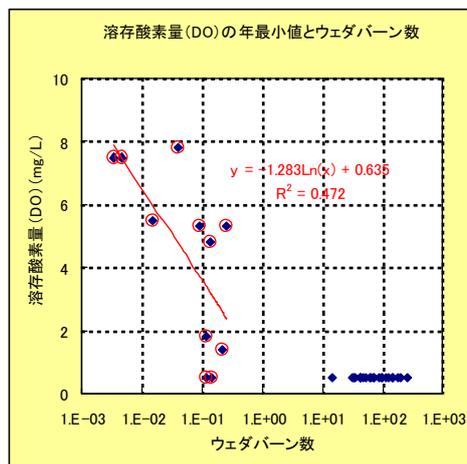


図 C3-1 底層溶存酸素量（DO）の年最小値とウェダバーン数

表 C3-1 検討に用いたデータの概要

		網走湖	小川原湖	涸沼	東郷池	湖山池	宍道湖
底層の溶存酸素量	平均値	0.5	0.6	6.8	9.2	2.8	3.5
	最大値	0.5	3.3	16.7	13.0	3.8	9.6
	最小値	0.5	0.5	0.5	4.8	0.7	0.5
	中央値	0.5	0.5	6.6	9.4	3.4	2.1
	対象期間	H20.5～H21.2	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H22.10～H23.8
ウェダバーン数	平均値	13.831	77.542	0.251	0.159	0.014	0.409
	最大値	16.434	261.481	1.118	1.039	0.043	1.098
	最小値	9.235	0.000	0.002	0.002	0.001	0.006
	中央値	14.827	61.490	0.102	0.023	0.013	0.324
	対象期間	H20.5～H21.2	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H20.4～H22.3	H22.10～H23.8

※底層 DO 測定下限値(0.5mg/L)未满是 0.49mg/L として扱った。

※1：山室真澄, 神谷宏, 石飛祐 (2011) 「汽水湖沼である宍道湖における成層に伴う貧酸素化と COD(Mn) との関係」 水環境学会誌 Vol. 34 No. 42, PP57～64.

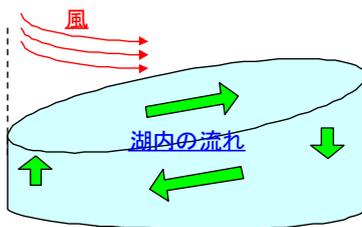
2.2.3 湖内の流動特性

[1] 湖内流動とその要因の関係

汽水湖の流動は気象、水文、天文、海象によりもたらされる風や海域と汽水湖の水位差が外力となって影響する。例えば、これら外力は次のように湖内流動に関わっている(図 2.2.3-1)。

- 湖面上に風が吹くと、水面の水は風に押されて風下方向に移動し流れを生ずる。この流れを吹送流といい、風が強いほど大きくなり、ときには湖内が混合される。
 - 海域と汽水湖の水位差により生じる潮汐流に応じ、塩水の遡上や下流への流下が見られ、その遡上が湖内流動に直接影響を及ぼす。
- その水位差には、外海の潮位や陸域からの河川流量が左右しており、それらは気圧や降雨量といった気象・水文条件が関連してくる。

■ 風に伴う流れ(吹送流)



■ 水位差に伴う流れ(潮汐流)

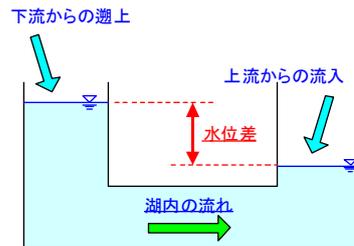


図 2.2.3-1 風や(海域と汽水湖の)水位差に伴う流れのイメージ図
(左：吹送流、右：潮汐流)

さらに湖内流動には湖沼地形(湖表面積、水深、湖底形状)や湖水の密度分布(水温、塩分)も左右する。

図 2.2.3-2 は、汽水湖における気象・水文・天文・海象の要因と湖内流動の関係を示したものである。湖沼技術会(2007)^{*1}によると「湖内に働く外力は、降雨・河川流入の水文要因、風や気温変化などの気象要因、外海の潮位変動(海象要因)が挙げられる」と述べており、そのことから汽水湖の流動が気象、水文、天文、海象の各要因と関わりがあることが伺える。

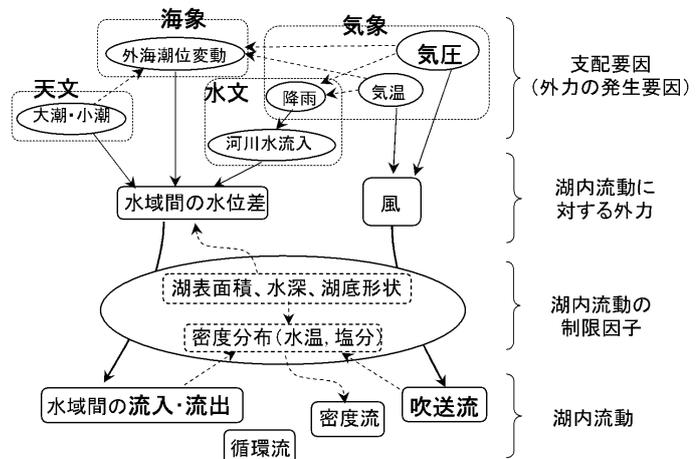


図 2.2.3-2 汽水湖における気象・水文・天文・海象の要因と湖内流動の関係

*1: 湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-249.

[2] 塩水・淡水の流入・流出

(1) 塩水の流入(遡上)・流出

塩水が汽水湖へ遡上するときには外海水の密度が大きいいため、下層へ潜り込む流れが生じる。

浜名湖の事例を図 2.2.3-3 に、網走湖の事例を図 2.2.3-4 に示す。どちらも塩水が下層へ潜り込み、湖底を這うように遡上している。

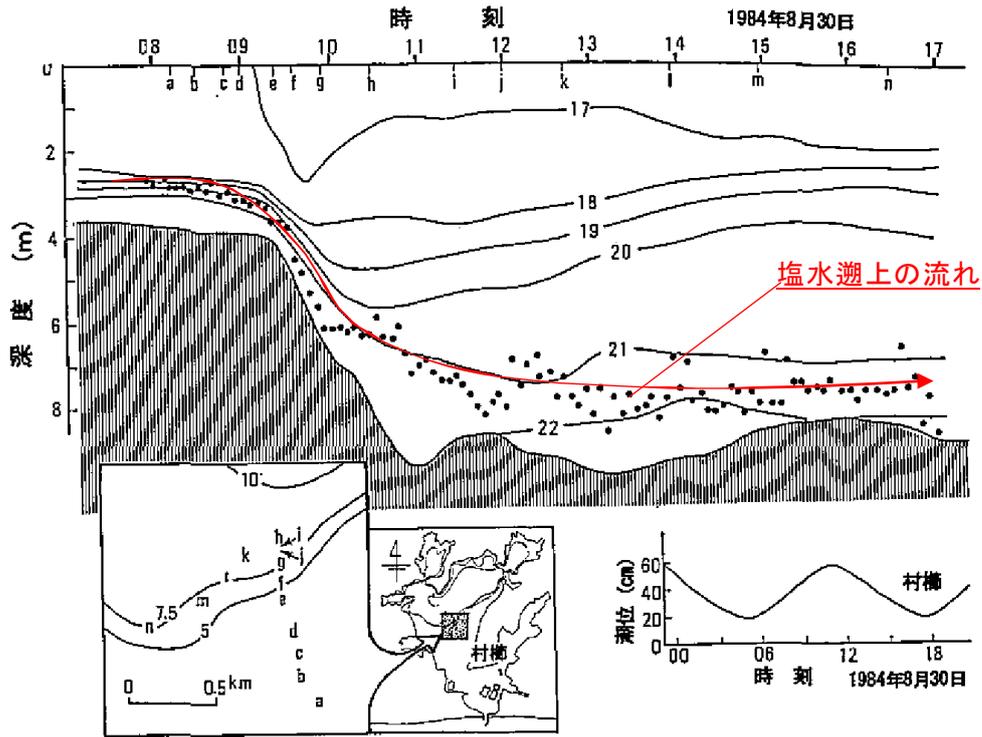


図 2.2.3-3 塩水遡上時の塩水追跡調査結果 (浜名湖の例)

※図中の等高線は密度(kg/m³)を示す (図は密度の上下流方向鉛直分布を示す)。●印は塩水を追跡しているブイの位置を示す。

※松田義弘(1999)「浜名湖のふしぎー内湾の自然と海水の動き」静岡新聞社, PP107.

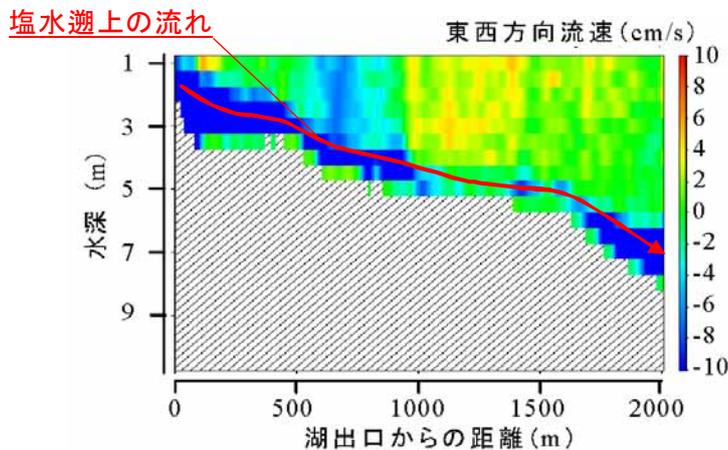


図 2.2.3-4 塩水遡上時の流速分布 (網走湖の例)

※観測日時 : H9. 11. 15(15:40~16:30)

※湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-57.

汽水湖内の水が外海へ流出するときの流れについて、池永ら(1998)^{※1}は図 2. 2. 3-5 に示すようなタイプがあることを述べている。

図 2. 2. 3-5 左図では、湖出口と湖内の塩淡境界面上(図中 A と B)の水頭差により塩水が吸い込まれるように流出しているものであり、このとき塩淡境界面は、比較的明瞭に保たれている。一方、図 2. 2. 3-5 右図では、淡水が下層の塩水を連行しながら上層を流下しているため、塩淡境界面が比較的不明瞭になりやすい。この場合、その連行に伴って下層の栄養塩類等が上層へ回帰されると考えられる。

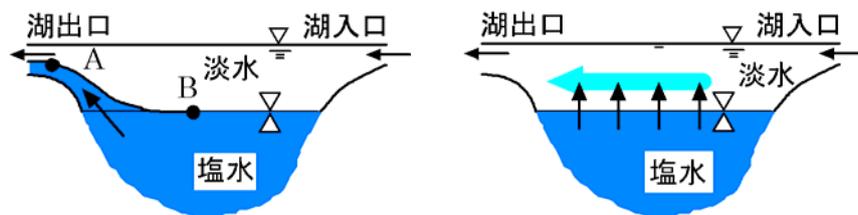


図 2. 2. 3-5 塩水流出形態のイメージ^{※1}

※1: 池永均・山田正・向山公人・大島伸介・内島邦秀(1998. 8)「網走湖の塩水化の機構と塩淡二成層の長期変動特性に関する研究」土木学会論文集 No600 II-44, PP85~104.

(2) 淡水の流入

湖内の塩分等の水質は流域からの淡水流入量にも左右されており、そのような淡水流入量は汽水湖の環境形成における重要な要素の一つである。

例えば、宍道湖の塩分変化は主な陸域からの主な淡水供給源となる流入河川の斐伊川の流量も影響要因の一つである(図 2. 2. 3-6)。また図 2. 2. 3-7 は網走川流量と網走湖下層の塩水層厚であり、融雪出水が生じているときなど、流量が多いときは塩水層厚が小さくなっている。

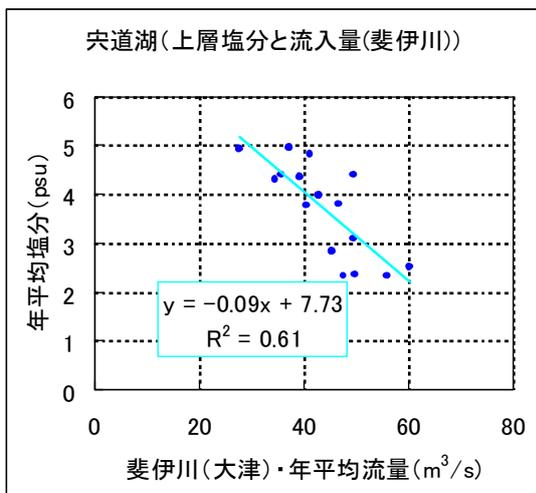


図 2. 2. 3-6 斐伊川流量と宍道湖塩化物イオン(湖心上層)の相関

※塩分は島根県のデータ、流量は国土交通省の水文・水質データベースホームページのデータに基づき作成。

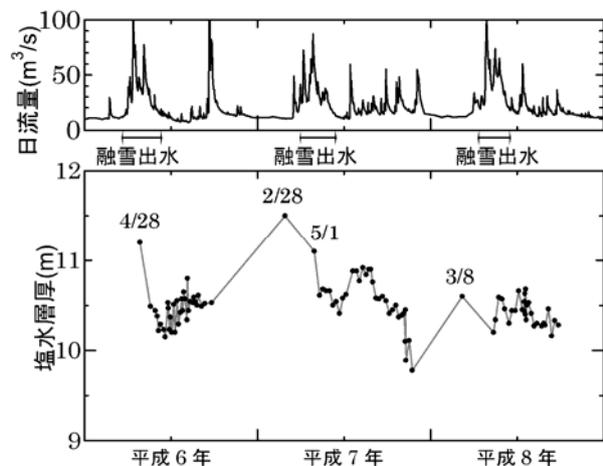


図 2. 2. 3-7 網走川の日流量と網走湖下層の塩水層厚の経時変化

※湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-31.

＜コラム 4＞低気圧による海面水位変動の汽水湖への影響

外海の海面水位は、気圧の変化に伴って変動し、気圧低下に対する水位上昇の割合は静的条件下で 1cm/hPa である。しかし、低気圧や台風の影響により、その関係が静的に釣り合わないことが多い。特に、日本海側では、図 C4-1 に示すとおり、気圧低下量と海面水位上昇量の関係が 1cm/hPa のラインより上方に分布していることが多い。すなわち、日本海側では、気圧の低下に伴う海面水位上昇量が大きいことが伺える。

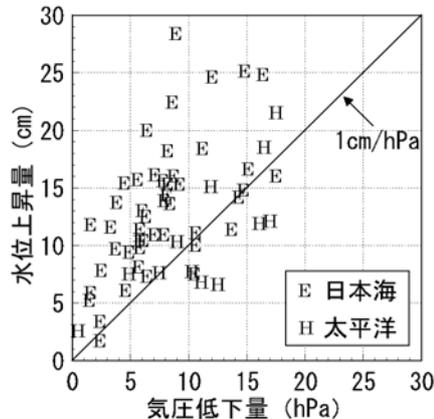


図 C4-1 気圧低下量と海面水位上昇量

※湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-256.

日本海側には三方五湖や中海、宍道湖などの汽水湖があり、それらの汽水湖では低気圧の移動に伴い、海面水位が上昇して塩水遡上量が増加している可能性が想定される。

宍道湖においては、低気圧の通過と小潮時の逆流時間が長い場合に中海水の流入が多くなることが確かめられている(Ishitobi et al. 1993)^{※1}。

※1: Ishitobi, Y., Kamiya, H., Itogawa, H. (1993) : Tidal, meteorological and hydrological effects on the water level variation in a lagoon, Lake Shinji. Jpn. J. Limnol., 54, 69~79.

図 C4-2 は、中海・米子湾奥底層における溶存酸素量(DO)、塩分、水温、流速(湾軸方向)の経時変化であり、その時期の気象状況を併記したものである。これを見ると、低気圧接近時に塩分の上昇、水温の低下が見られており、その後、溶存酸素量(DO)が一時的に回復している。

このことから、低気圧の接近に伴って海面水位が上昇したため、中海への塩水遡上量が多くなり、その塩水が下層へ潜り込んで流入したと考えられる。

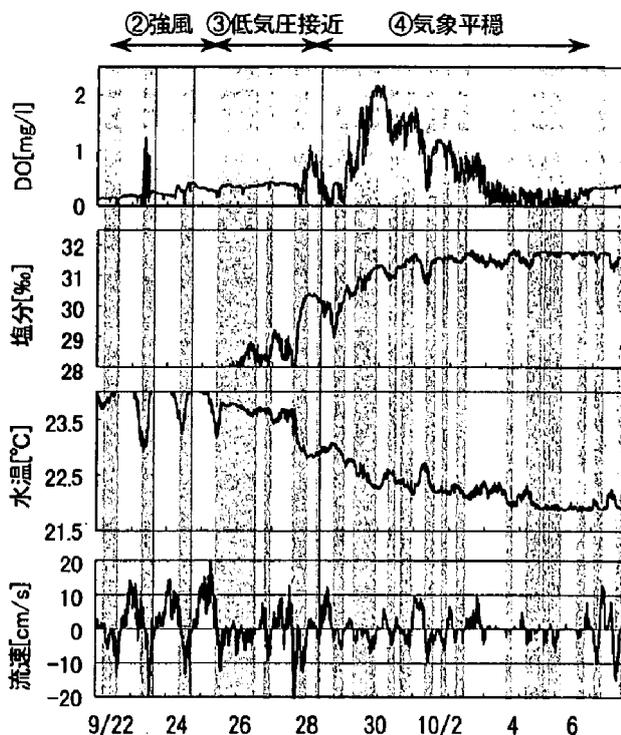


図 C4-2 中海・米子湾奥下層における DO、塩分、水温、流速(湾軸方向)の経時変化(1997/9/22~10/6)

※福岡捷二ほか(1999)「中海における気象変化に伴う流れと貧酸素水塊の挙動」土木学会論文集 No. 636/VII-13, PP61~79.

※図中の網掛部分は流れが湾奥方向のときを示す。

[3] 風に伴う湖内の流れ

湖面上に風が吹くと、水面の水は風に押されて風下方向に移動し流れ（吹送流、前述の図 2. 2. 3-1 参照）が生じ、吹送流は風が強いほど大きくなる。吹送流は、湖面を風下に流動させるため、風下側が高くなる吹き寄せが生じ、その作用の元での強制的な水面の振動（静振(セイシュ)）が発生する。

そのような風に伴う湖内の流れの大きさに応じ青潮が発生する場合がある（図 2. 2. 3-8 参照）。青潮とは、強風が一定時間連続して吹いた場合に水が風下に吹き寄せられ、風上側に溶存酸素量(DO)に乏しく硫化水素等を多く含む下層の水塊が上昇するものであり、魚類の斃死等の被害をもたらすことから、汽水湖の問題の一つになっている。

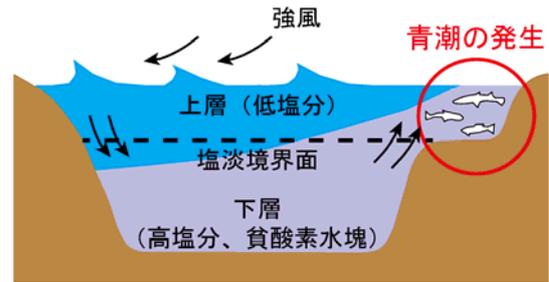


図 2. 2. 3-8 青潮の概念図

図 2. 2. 3-9 は網走湖における強風時の塩分鉛直分布である。本図では上流から下流方向へ強風が生じたことにより、塩淡境界層が風上側で上昇して塩水層が水面下 3m 付近まで達していた。この上昇が大きくなれば青潮が生じることが想定される。

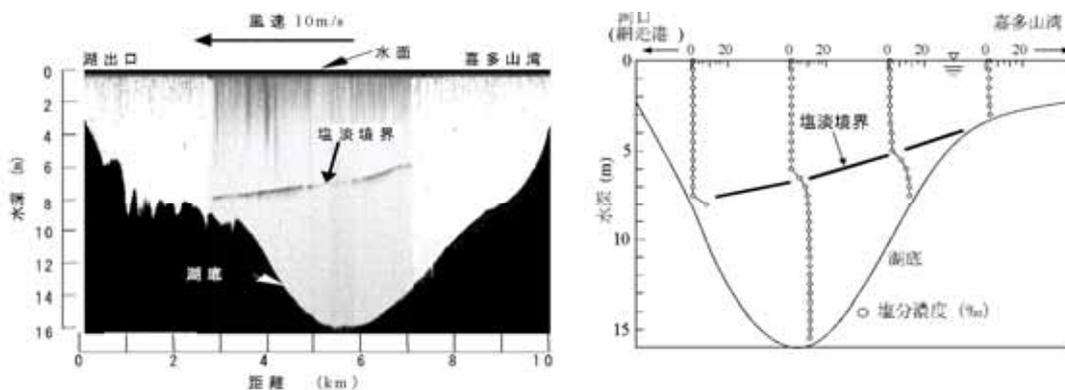


図 2. 2. 3-9 強風時の網走湖の塩分濃度鉛直分布縦断図(左は超音波による映像)

※平成 7 年 11 月 9 日 11:00~11:40(平均風速 7.2m/s)

※湖沼技術会(2007)「湖沼における水理・水質管理の技術」国土交通省, PP6-37.

また浜名湖の場合、通年で卓越している東西風が湖内流動に大きく影響しており、塩淡水境界面が東西に大きく変動している(図 2.2.3-10)。

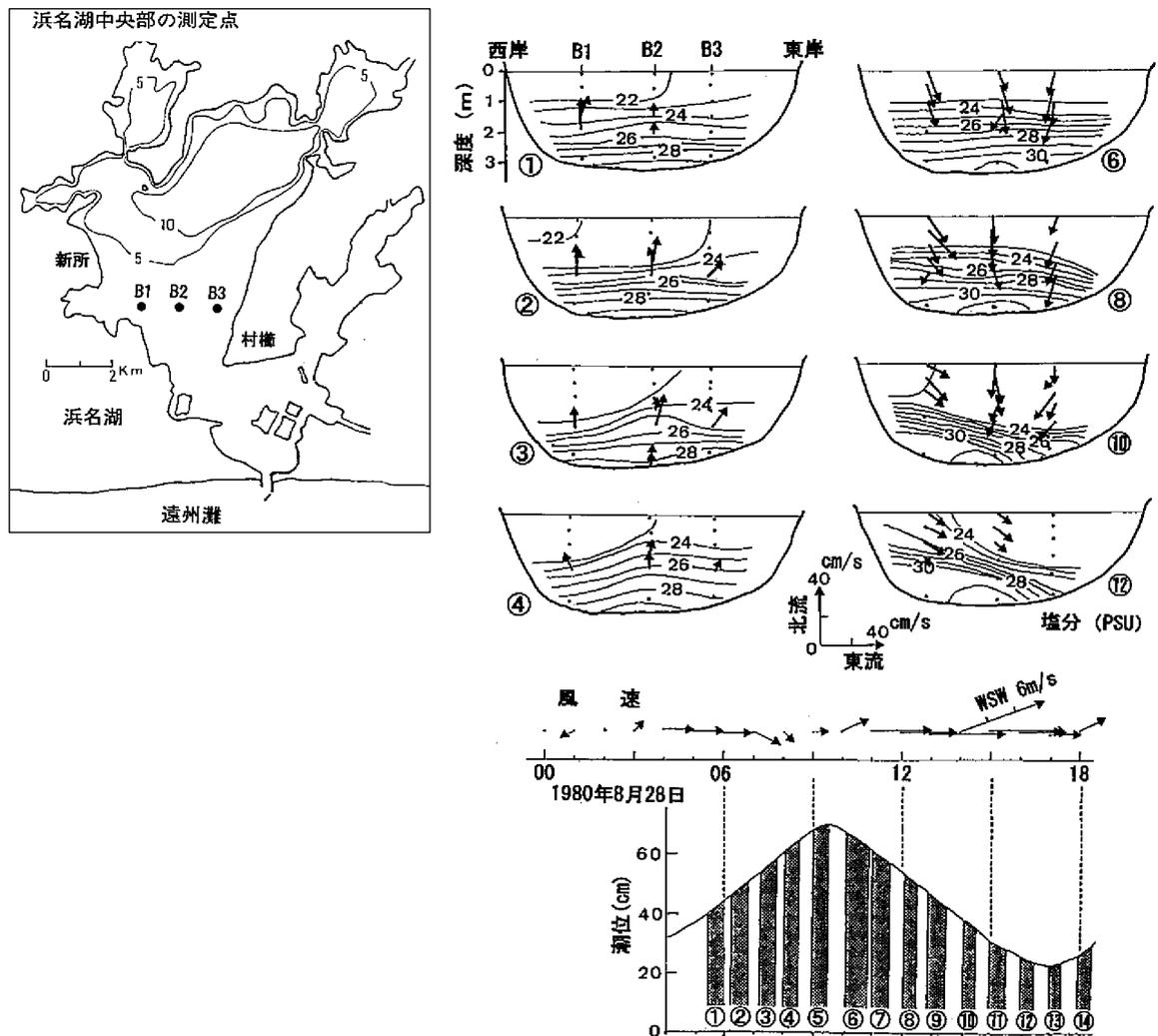


図 2.2.3-10 浜名湖の東西断面での塩分と流速経時変化

※各断面中に塩分(実線)と流速(ベクトル)を示す。上向きベクトルは、北への流れを示している。測定時刻は下段の潮位図に番号で示す。潮位は右図の新所のものを示す。また測定期間中の風速を中段に示す。
 ※松田義弘(1999)「浜名湖のふしぎー内湾の自然と海水の動き」静岡新聞社, PP85.

[4] 汽水湖の水交換

汽水湖は流域からの淡水流入と外海からの塩水遡上に伴う水交換によって物質の輸送が行われ、その水交換が水質への影響要因の一つになる。

例えば厚岸湖では、水の水交換が悪い湖奥に COD 濃度が高い水塊が停滞することがある。「自治体アンケート」でも、湖奥が停滞しやすいため、夏季に底泥から栄養塩の溶出(特にリン)が見られているという回答を得ている。

厚岸湖では図 2.2.3-11 に示すとおり、別寒辺牛川の流入部と湖奥で COD が高い傾向にある。流入部 COD については、湿原から溶出したフミン物質を多く含む COD 濃度の高い水が大量に流入することにより高くなっている。一方、湖奥 COD については、別寒辺牛川の流入部と海への湖口が近いことから、それらを結ぶ滞筋が強くなってきたことにより湖奥が停滞しやすくなっているため、夏季に底泥から溶出したリン濃度の上昇に伴って植物プランクトン等の内部生産により高くなっていると考えられている。

これに対して海側の湖口付近は COD が低い値を示しており、塩水の遡上が水の交換を促進していることにより、その部分の水質が希釈等により良くなっている可能性が想定される。



図 2.2.3-11 厚岸湖の COD 濃度分布

※地方独立行政法人北海道立総合研究機構
(2012)「えころぶ北海道」環境科学研究センターニュース第 30 号, P3.

2.2.4 湖内の水質・底質特性

[1] 水質負荷収支

(1) 汽水湖へ流入する水質負荷

汽水湖は流域の最下流に位置することから、流域から栄養塩類等の汚濁負荷を含む様々な人為的インパクトを受けやすい(図 2.2.4-1)。

また湖沼の水質負荷収支については、淡水湖の場合、流域から流入する汚濁負荷と、湖内で内部生産(湖底からの栄養塩類等の溶出、植物プランクトン増殖等)による負荷があり、基本的に上流から下流方向への一方通行のものである。

しかし、汽水湖では加えて下流から遡上する塩水による負荷があり、淡水湖と比べ

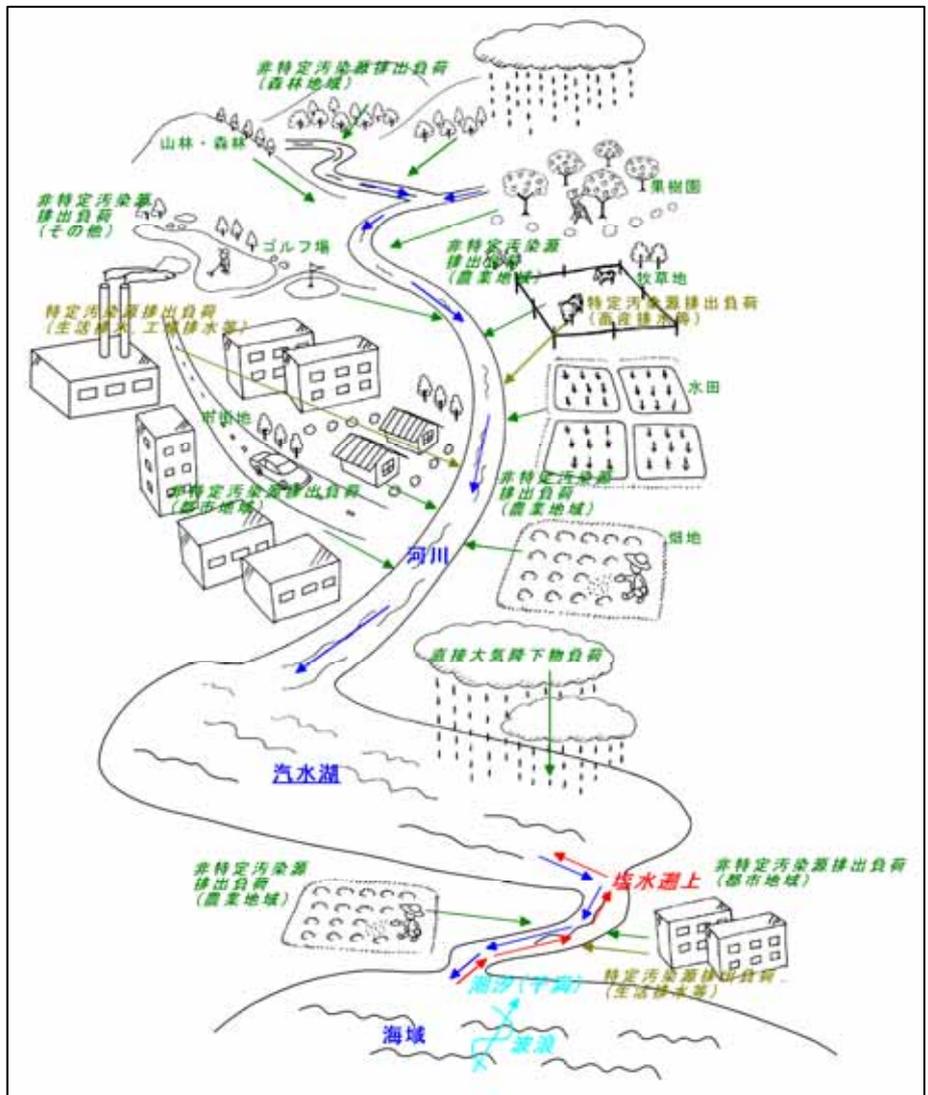


図 2.2.4-1 汽水湖への流域の人為的インパクトのイメージ

て複雑である。このため、汽水湖の水質負荷を捉えるには上流からだけではなく下流からの塩水遡上に伴う流入負荷把握が必要である。

図 2.2.4-2 は湖沼の COD 負荷収支の検討例である。湖沼の場合、塩水は外海から下流の那珂川、湖沼川を経て遡上する。このことから、湖内への負荷を考えるとときには、その間の流域負荷を考慮する必要がある。また湖内から流出した負荷の逆流も考慮する必要がある。湖沼では上流から流入する負荷量が全体の約 2 割であるのに対し、下流からの遡上に伴う負荷量(湖内流出負荷の逆流も含め)が全体の約 6 割と大きく、また海域からの負荷(那珂川含む)も全体の約 2 割を占めているように、遡上水は湖内水質へ大きく寄与している。

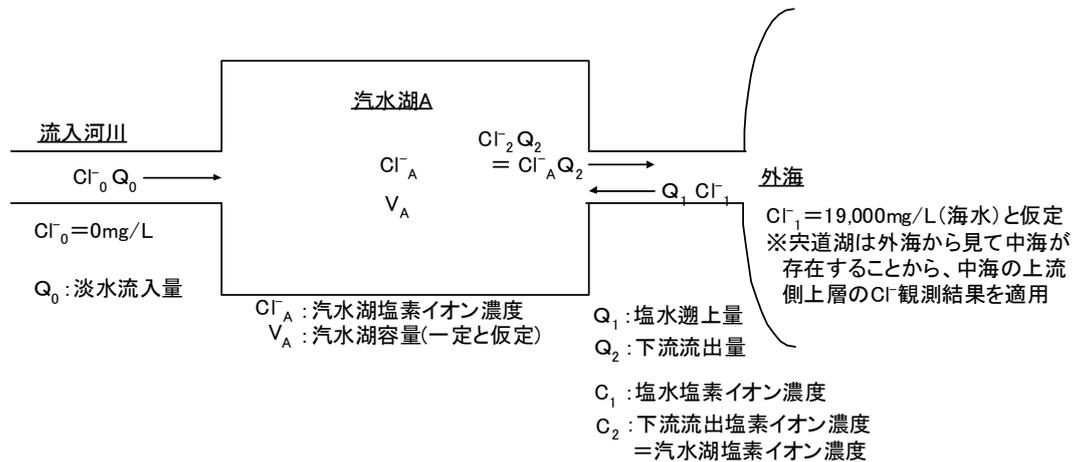
(2) 塩水遡上量の把握

1) 遡上量を概略的に把握するための方法

汽水湖は、上流(陸域)からの流入のほか、下流から塩水が遡上するため、汽水湖への流入負荷や湖の回転率等を把握するには、塩水遡上量を明らかにすることが必要である。塩水遡上量を把握するには、シミュレーションモデル等を活用した検討などが必要であるが、その作業は大掛かりなものであるとともに、そのような詳細な検討を行う前に概略的に把握して目安をつけておくことが重要である。

そこで、塩水遡上量について、概略的に把握したい(目安をつけたい)場合において、湖内の塩分変化を考慮した水収支に着目して簡易的に試算する方法を紹介する(Kamiya et al. 2011)。

この考え方は、図 2.2.4-4 に示すとおり、ボックスモデルの観点から完全混合による湖内の塩分変化量を考慮し、次式(A)、(B)より塩水遡上量 Q_1 を試算するものである。



$$\begin{cases} V_A \times \frac{\Delta Cl^-_A}{\Delta t} = Q_0 \times Cl^-_0 + Q_1 \times Cl^-_1 - Q_2 \times Cl^-_2 & \dots \dots (A) \text{式} \\ Q_0 + Q_1 = Q_2 \quad (V_A: \text{一定}) & \dots \dots (B) \text{式} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow Q_1 = \left(V_A \times \frac{\Delta Cl^-_A}{\Delta t} + Q_0 \times Cl^-_0 \right) / (Cl^-_1 - Cl^-_A)$$

図 2.2.4-4 ボックスモデルに着目した塩水遡上量の試算

このとき、対象汽水湖(上図 A)の水位変動は考慮しておらず、1ヶ月単位で算出している。またここでは完全混合を前提として計算するため、塩水遡上量 Q_1 は湖へ流入する塩分負荷量と下流へ流出する塩分負荷量の差(次式(C)式)は0になるように算出している。

$$\underbrace{Q_0 \times Cl^-_0 + Q_1 \times Cl^-_1}_{\text{Inflow}} - \underbrace{Q_2 \times Cl^-_2}_{\text{Outflow}} \rightarrow 0 \dots \dots (C) \text{式}$$

ただし、計算結果について上記(C)式の Inflow、Outflow を算出したとき(表 2.3.4-1 に宍道湖の検算結果の例(Kamiya et al. 2011))、上記 (C) 式が 0 にならず、年によってはその絶対値が 0 と比べて大きくなることもある。ここでは概略的な検討であるため、そのような差が見られるように精度が粗いものであること (Inflow-Outflow が表 2.3.4-1 に示すようなバラツキが見られる) に留意する必要がある。しかし、上記手法のようなものに着目し、塩水遡上量を概略的・簡易的に把握しておく(目安をつけておく) ことは汽水湖環境の現象等を検討する上で重要なことである。

表 2.2.4-1 検算結果の例(宍道湖)

年	①Inflow × 10 ⁹ kg/年	②Outflow × 10 ⁹ kg/年	③Inflow-Outflow × 10 ⁹ kg/年
1993	2.80	2.73	0.07
1994	4.10	5.70	-1.60
1995	3.94	3.39	0.55
1996	3.50	3.65	-0.15
1997	3.42	3.33	0.09
1998	2.58	2.64	-0.06
1999	5.62	6.42	-0.80
2000	6.78	6.49	0.29
2001	3.70	3.67	0.03
2002	4.23	5.11	-0.88
平均	4.07	4.31	-0.24

※Hiroshi Kamiya・Hitoshi Ohshiro・Yu Tabayashi・Yoshihiro Kano・Koji Mishima・Toshiyuki Godo・Masumi Yamamuro・Osamu Mitamura・Yu Ishitobi(2011) “Phosphorus release and sedimentation in three contiguous shallow brackish lakes, as estimated from changes in phosphorus stock and loading from catchment” Landscape and Ecological Engineering, January 2011, Volume 7, Issue 1, pp 53-64.

※Inflow：流入する塩分負荷量、Outflow：流出する塩分負荷量であり、ともに単位は 10⁹kg/年である。

2) 塩水遡上量算出時における汽水湖の塩化物イオン濃度 Cl^-_A の扱い方

汽水湖においては塩分成層が形成されることから、上下層の塩化物イオン濃度が異なる湖沼が多い。このため塩分遡上量算出時には、対象とする汽水湖容量 V_A 、汽水湖塩化物イオン濃度 Cl^-_A に応じて算出結果が異なる。

対象とする汽水湖容量 V_A 、汽水湖塩化物イオン濃度 Cl^-_A はボックスモデルの観点から算出するので、 V_A は全容量を、 Cl^-_A は上下層平均を対象とすることが想定される。ただし上下層平均 Cl^-_A は、湖内で上下層の容量比がことなることから、上下層の塩化物イオン濃度を考慮した加重平均で設定する。

例えば、塩分成層が形成されている上下層で区分したとき、上下層の容量比が 7:3 とし、そのときの塩化物イオン濃度が上層で 500mg/L、下層で 2,000mg/L という場合、汽水湖塩化物イオン濃度 Cl^-_A は、650mg/L(= (500×7+1000×3)/(7+3)) と設定する。

[2] 湖内の水質・底質変化のメカニズム

(1) 底層の貧酸素化

成層している汽水湖の上層においては、大気からの酸素供給、藻類の光合成活動による酸素生産、流入淡水の上層貫流（流入）に伴う酸素補給により、酸化的環境（好気的環境ともいう）を維持することができる。

しかし、底層においては、上下方向の水の交換が行われなくなることから、上層から酸素が供給されにくくなり、また湖水や底泥の有機物等により水中の酸素が消費され続け、貧酸素水塊が形成される(図 2. 2. 4-5)。この結果、底層は底泥が強い還元的環境になり、底泥から硫化水素の発生や栄養塩等の溶出が見られやすくなる。

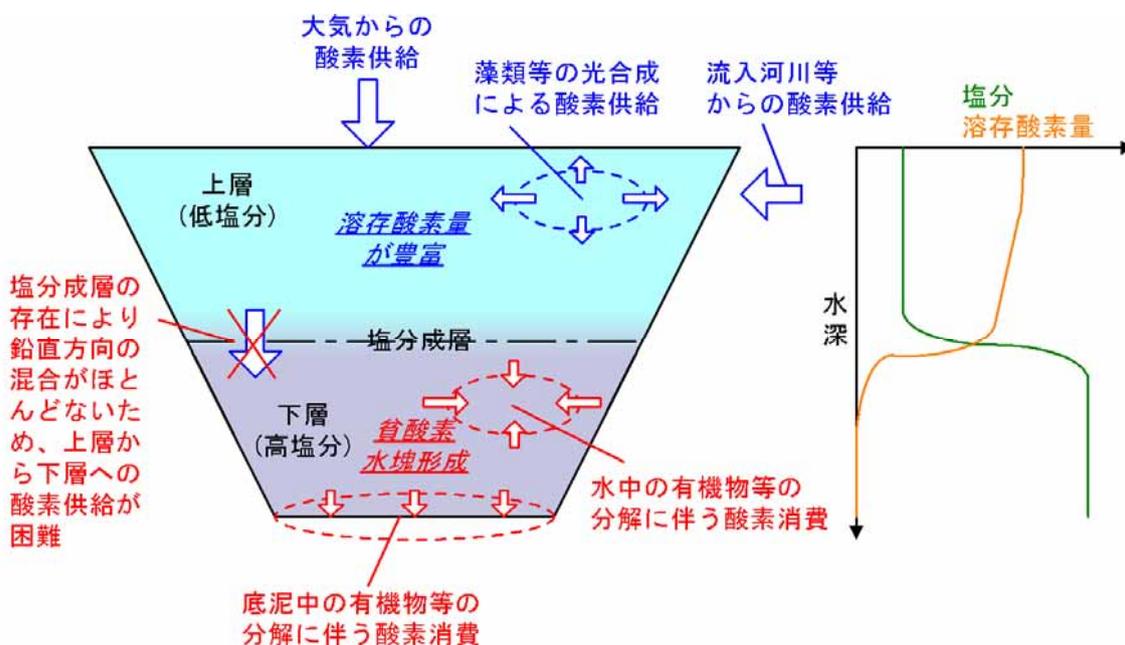


図 2. 2. 4-5 成層に伴う下層の貧酸素化

<コラム 5> 好気層と嫌気層における底質の有機物化合物の分解の違い

水域の堆積物中にはある程度の有機物が含まれており、その大部分が細菌の呼吸を通じて無機化される。堆積物の表面に酸素が豊富に供給されている状況（酸化的環境下(好氣的環境下ともいう)）では好気性細菌が酸素呼吸を行うことによって有機物が分解（酸化分解）される(図 C5-1)。

しかし、酸素が十分でない場合（還元的環境下（嫌氣的環境下ともいう)）は酸素以外の物質を呼吸に用いる嫌気性細菌によって有機物が分解されるので、メタンの生成、硫酸や硝酸の還元が見られる(図 C3-1)。

それらの分解の発生時の酸化還元電位^{※1}は、概ね酸化分解>硝酸還元>硫酸還元>メタン生成の順にあり、還元的環境下になるほど硫酸還元、メタン生成が行われ、硫化水素 (H₂S) 発生を促進する(図 C5-1 の右側参照)。特に汽水湖では、硫化物イオンが外海からの塩水遡上に際して供給され、底質へ蓄積されるので、底層で貧酸素化が生じると硫化水素が生じやすくなる。ただし、硫化水素は堆積物に鉄(II)イオンが存在するときは硫化鉄となって沈殿し、一方、存在する鉄よりも硫化水素の存在量が多くなったとき、水中へ溶出して生物などへの影響を及ぼすようになる。

※1: 酸化還元電位 (ORP) :対象の物質が他の物質を酸化しやすい状態にあるのか、還元しやすい状態にあるのかを示す指標。大きければ（プラスであれば）酸化力が強いこと（酸化的(好氣的)環境にあり)、小さければ（マイナスであれば）還元力が強いこと（還元的(嫌氣的)環境にあり)を示している。

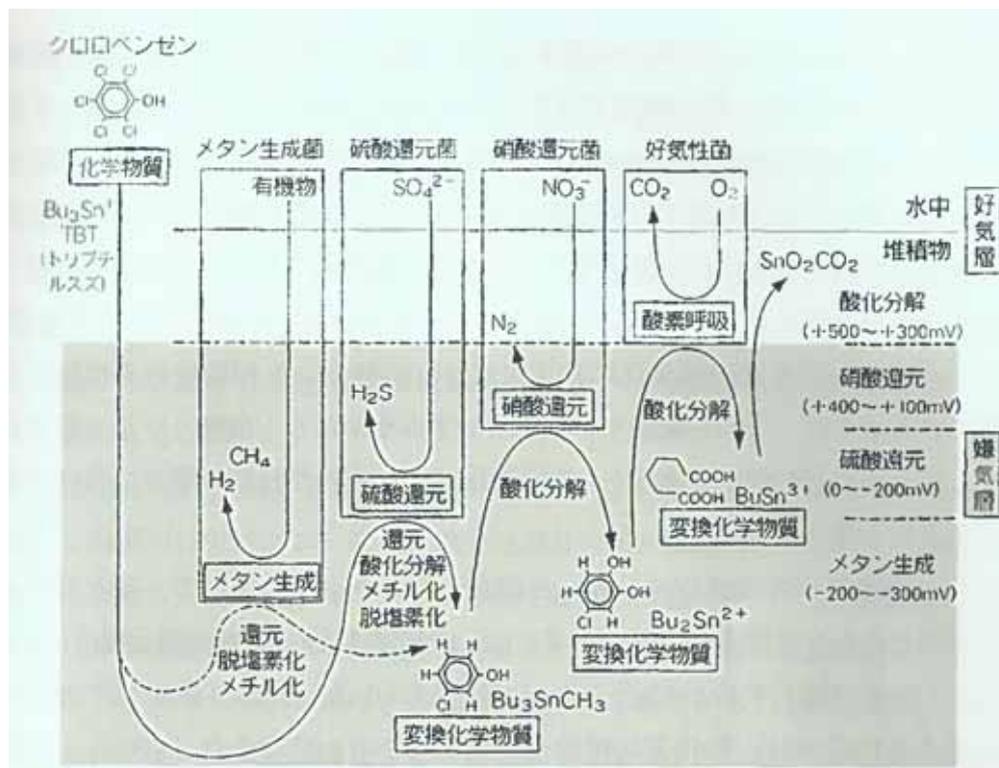


図 C3-1 微生物代謝形式と堆積物の酸化還元電位 (ORP) との関係、及びそれぞれの代謝に付随して生じる有機物化合物の分解様式

※山室真澄ほか(2013)「貧酸素水塊 現状と対策」生物研究社, PP23.

(2) 硫化水素の発生

硫化水素の発生は汽水湖の問題点の一つであり、水産資源に影響を及ぼす。底層の貧酸素化は酸欠により水生生物の生息を困難にさせる。ただし、水生生物にとってはそれよりも硫化水素に曝露される方が致命的になると考えられる。

湖沼底質については、淡水湖と硫酸イオンを含む海水が流入する汽水湖で比較すると、硫酸イオンの存在状況の違いにより堆積物の質が異なる。底層が還元的環境下に陥ると、硫酸還元菌が硫酸イオンを利用して有機物を分解する硫酸還元を底泥表層付近で行い（前述の図 C5-1 参照）、腐卵臭を有する硫化水素（ H_2S ）を発生し、黒色の硫化鉄等を形成する。この結果、底質は腐卵臭のする黒色泥になることが多い。

一方、淡水湖の場合、そのような硫酸イオンが少ないことから暗褐色～暗青灰色の泥が多く、有機物が多いとドブ臭を発する。

すなわち汽水湖は、流域の最下流に位置することから流域からの有機物が多く蓄積されているほか、硫酸イオンを含む海水が流入するため淡水湖よりも底層が貧酸素化するに伴い、硫化水素を発生しやすい。

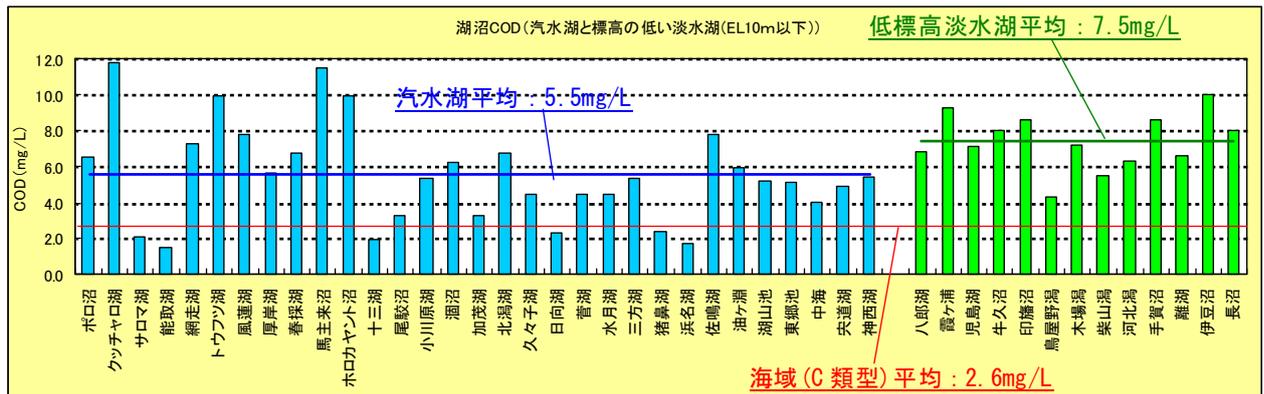


図 2.2.4-8 汽水湖と低標高の淡水湖(EL. 10m 以下)の COD<H21 年>

(2) 汽水湖と淡水湖の窒素・リン比 (N/P 比)

汽水湖と淡水湖の窒素・リン比 (以下、「N/P 比」と称す) を図 2.2.4-9(1)～(2)に示す。これらの淡水湖については、標高の高い位置にあるカルデラ湖などはリンが入りにくいことから、別途、図 2.2.4-10 に湖沼成因区分別に標高と併せて整理した。また参考として海域の N/P 比を図 2.2.4-9(3)に併記した。

N/P 比については、淡水湖では N/P 比が 10 以上のものが多く見られ、20 以上のものも存在しており、リン制限の傾向が見られている。一方、海域は N/P 比が 10 前後のものが多く存在しており、20 以上のものがほとんど見られず、窒素制限の傾向が見られている。

このようなことから、汽水湖は流域の最下流に位置して海水の遡上が見られることから、N/P 比が淡水湖より低い傾向にあり、リン制限、窒素制限のどちらかに偏る傾向が見られないと想定される。図 2.2.4-9(1)に示す汽水湖の N/P 比を見ると、20 以上のものがいくつか見られるものの、海域のように 10 前後のものも多く存在している。図 2.2.4-9(1)～(3)に挙げた汽水湖、淡水湖、海域を対象に N/P 比の各平均を見ると、海域 10.1<汽水湖 12.6<淡水湖 26.1 となっており、汽水湖はやや海域に近い状況にあった。また淡水湖の N/P 比は成因別で見ると海跡湖や標高の低い堰止湖 (霞ヶ浦や児島湖など) がカルデラ湖や火山湖などと比べ低い状況にあった。

このことは、リン負荷は河川が流下する過程で流域からの流出に伴って増していくことから、カルデラ湖のような淡水湖や上流 (標高の高い) の淡水湖ではリンが少ないために N/P 比が高いものの、下流に位置する汽水湖や淡水湖、河川の流出先である海域では N/P 比が低くなっている可能性があると考えられる。

ただし、ここでは水域 (汽水湖、淡水湖、海域) 別の特徴を把握するために N/P 比の年平均値を用いたが、N/P 比は季節的に変動するものであり、その変動は各湖で異なる (図 2.2.4-11)。このため、個々の汽水湖で N/P 比に着目した検討を行う場合、その湖沼の N/P 比の季節的変動も捉えることが必要になると考えられる。

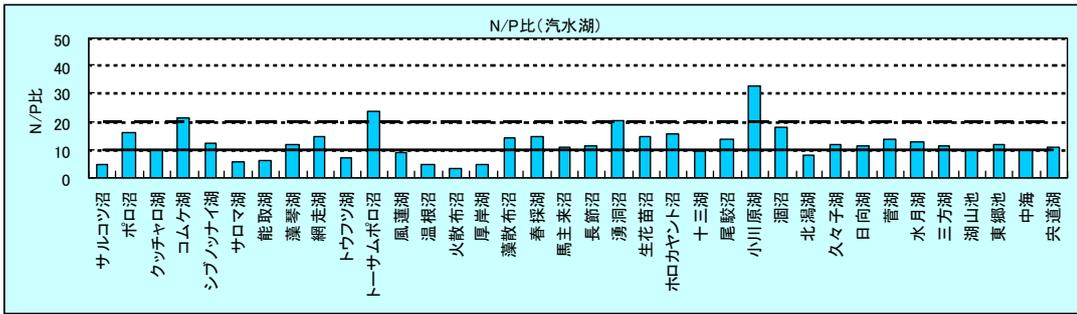


図 2.2.4-9 (1) 汽水湖の N/P 比

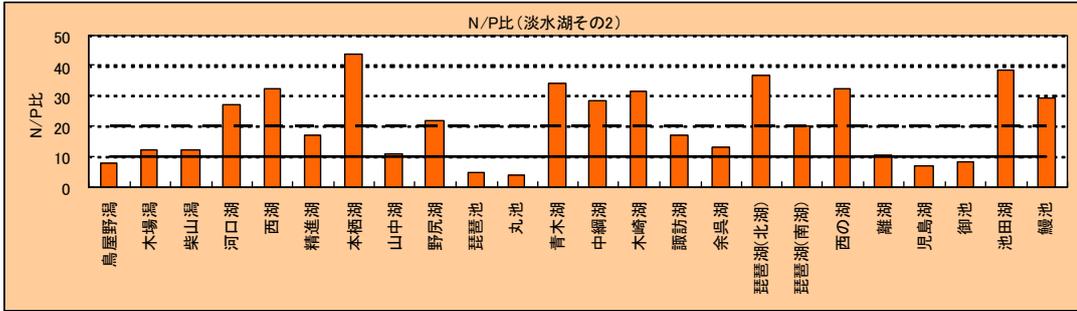
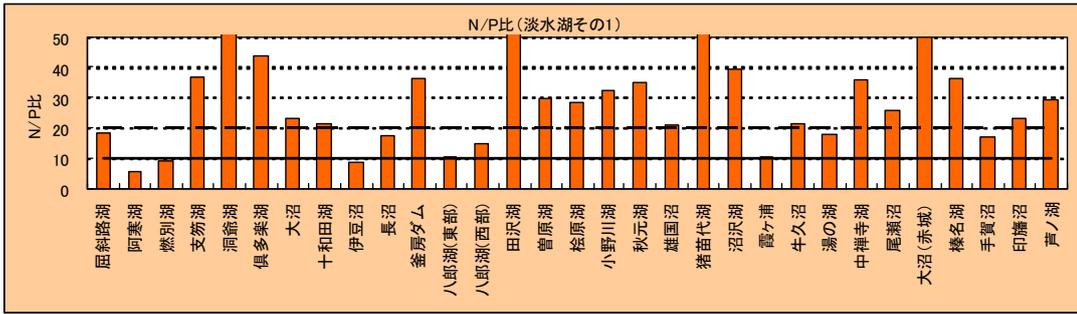


図 2.2.4-9(2) 淡水湖の N/P 比

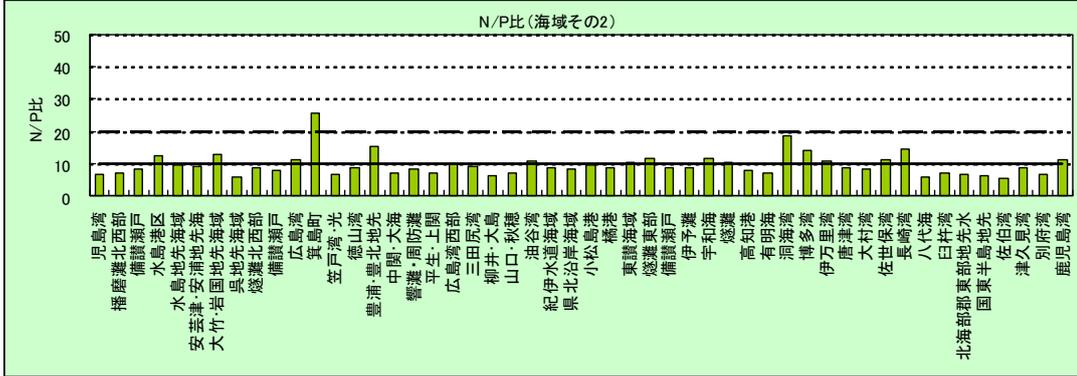
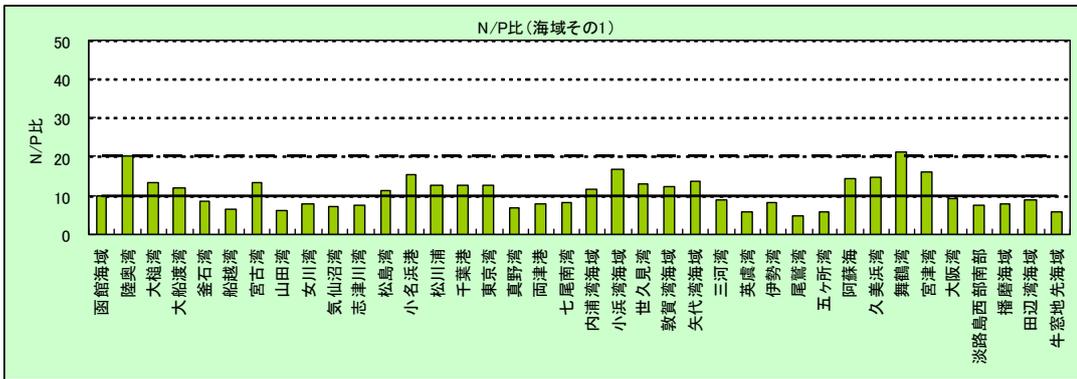
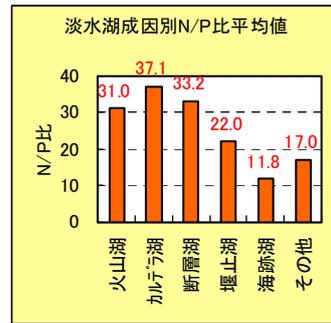
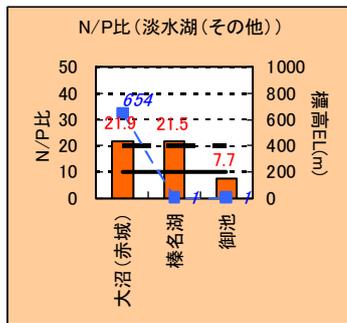
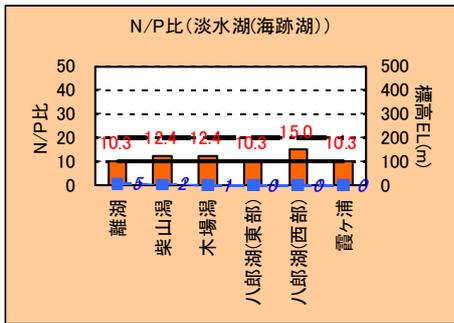
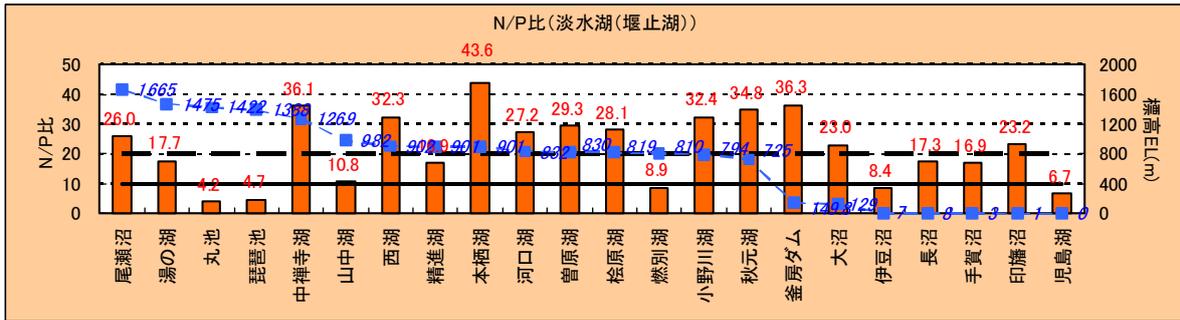
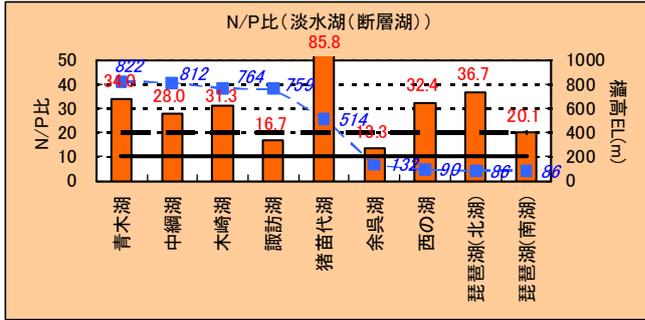
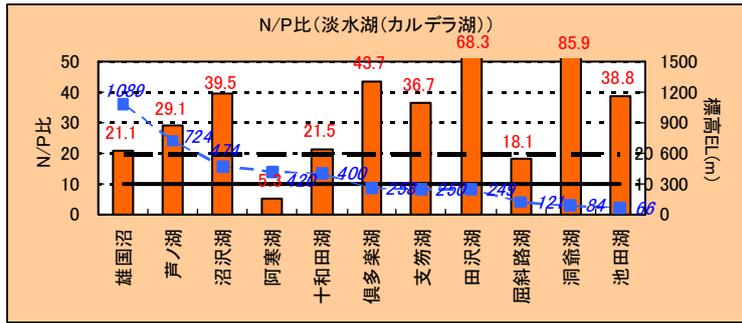
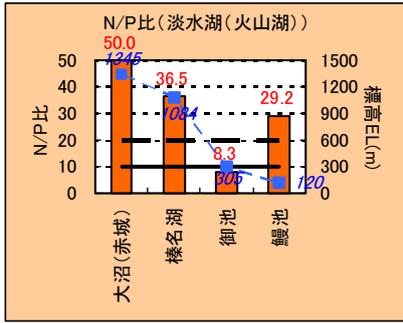
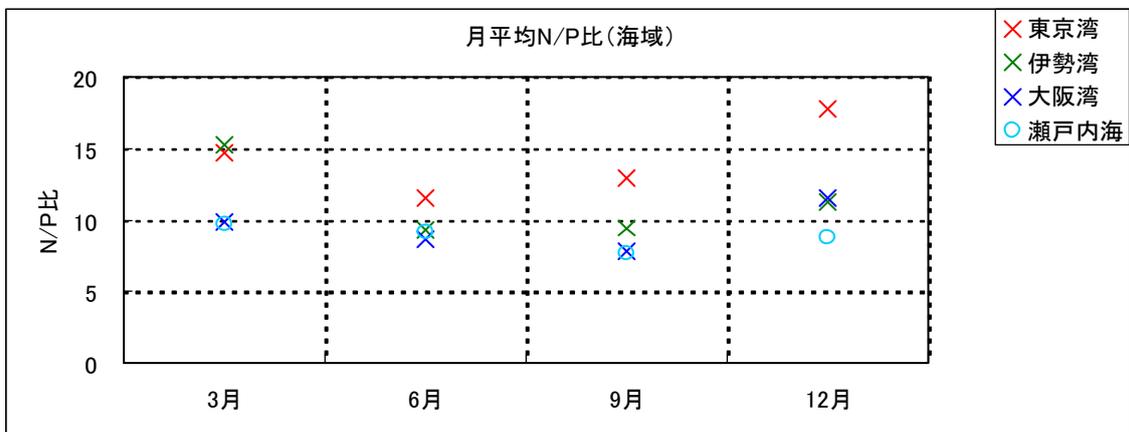
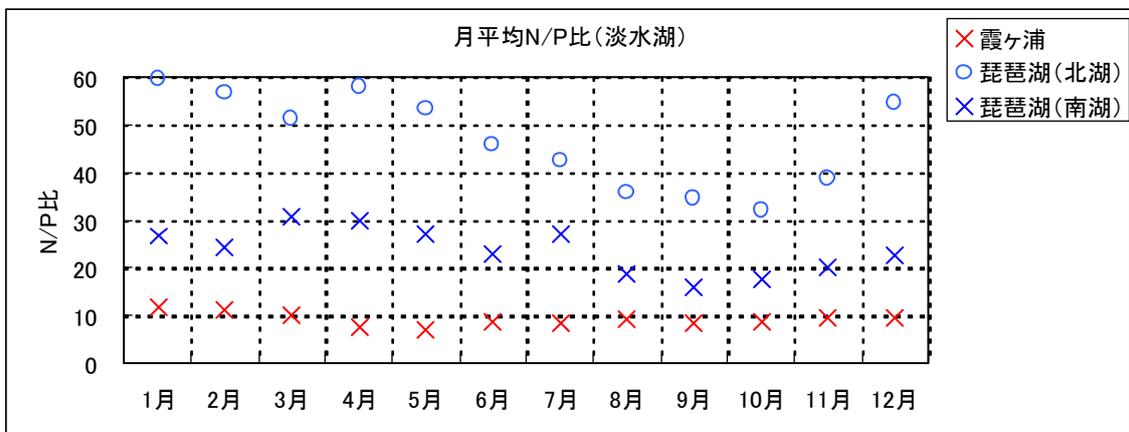
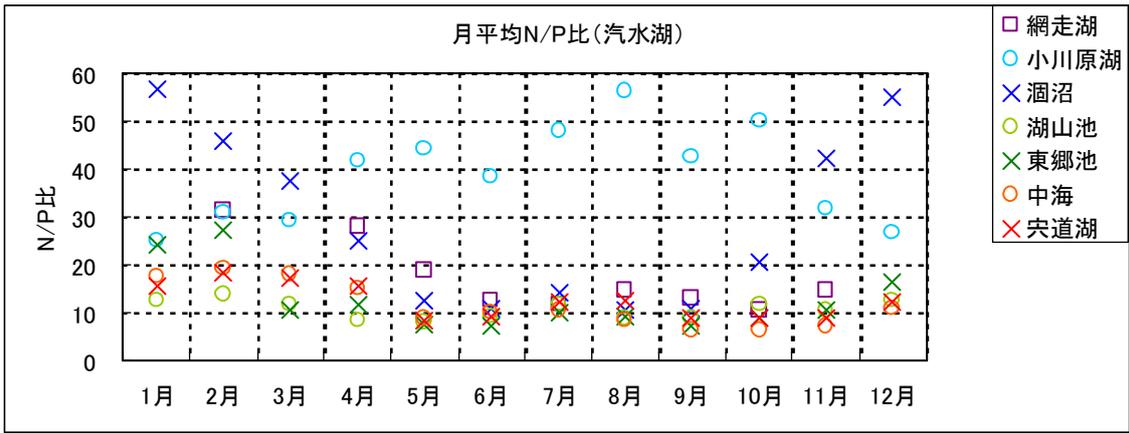


図 2.2.4-9(3) 海域の N/P 比



■ NP比(赤色文字)
 ---■--- 標高(青色斜文字)

図 2.2.4-10 淡水湖の N/P 比 (湖沼成因別・標高も併記)



※汽水湖、淡水湖は湖心における公共用水域水質調査結果を上図で示した。

※海域は広範囲に及ぶことから広域総合水質測定結果を参考にした。ただし広域総合水質測定は下表に示すとおり複数の地点で行われているため、上図はそれらの平均値を示した。

* 海域の広域総合水質測定(環境省)データ地点数[H23年調査]

地点数	3月	6月	9月	12月
東京湾	14	70	42	42
伊勢湾	66	66	66	66
大阪湾	10	10	10	10
瀬戸内海	238	238	238	238

図 2.2.4-11 N/P 比の季節的変動の一例

(3) クロロフィル a (Chl-a) と塩分・全窒素(TN)・全リン(TP)の関係

汽水湖の水質については、淡水湖と異なり、植物プランクトンの指標になるクロロフィル a (Chl-a) の状況が栄養塩類(全窒素(TN)・全リン(TP))のみならず、塩分による影響も受けていることが想定される。そこでクロロフィル a (Chl-a) 等の水質について、「自治体アンケート」から得られた結果や公共用水域水質調査結果など^{※1}から入手したデータに基づき、汽水湖におけるクロロフィル a (Chl-a) と全窒素(TN)、全リン(TP)、塩分の関係を各汽水湖の平均値より整理し、図 2.2.4-12 に示した。

なお、塩化物イオン(Cl⁻)はクロロフィル a (Chl-a) と比べて桁が大きくなりすぎるため、塩分(PSU)に換算して整理した。クロロフィル a (Chl-a) 整理時の全窒素(TN)・全リン(TP)は、Chl-a と TN、TP の比較をしやすいよう $\mu\text{g/L}$ で統一してとりまとめた。また北海道の汽水湖は、泥炭(難分解性有機物)の存在や寒冷地のため水温が低いことなどによる影響が見られるため、「北海道の汽水湖」、「北海道以外の汽水湖」に区分して整理した。

※1:国土交通省「水文水質データベースホームページ」(<http://www1.river.go.jp/>)や北海道環境科学研究所(2005)「北海道の湖沼—改訂版」のデータも参考にした。

塩分とクロロフィル a (Chl-a) の関係については(図 2.2.4-15 の上段)、全般的に低塩分の湖沼で高く、高塩分の湖沼で低い傾向があるように見える。このように高塩分の湖沼でクロロフィル a (Chl-a) が低いのは、海水との交換率の高さ(海水による希釈)などによることが考えられる。また相関係数 R^2 については北海道、北海道以外の双方で高かった。

全窒素(TN)、全リン(TP)とクロロフィル a (Chl-a) の関係(図 2.2.4-15 の下段)については、どちらも非線形の関係であるが、右肩上がり(TP、TN が増せば Chl-a も増える)の傾向を示していた。相関性については、TN と Chl-a との関係が北海道、北海道以外の双方で、TP と Chl-a との関係が北海道以外で高かった。これに対して北海道の TP と Chl-a の関係はややバラツキが見られたが、右肩上がりの傾向があるものと考えられた。

以上のとおり、汽水湖のクロロフィル a (Chl-a) は栄養塩類に左右されるものの、塩分による影響も大きく受けている可能性が考えられる。このように塩分がクロロフィル a (Chl-a) に関わっているのは、海水からの希釈のほか、塩分による植物プランクトンの生息状況への影響や、塩水の影響を受けて形成される湖内の成層及びそれに伴う底層の貧酸素化～栄養塩類の溶出等に左右する要素となっていることによるものと考えられる。

このため、植物プランクトンの指標となるクロロフィル a (Chl-a) の状況を把握するには、検討対象とする汽水湖の全窒素(TN)、全リン(TP)、塩分に着目して検討を行うことが望ましいと考えられる。ただし、汽水湖によっては、水質データが通年的なデータでなく、数年に1回のデータである場合がある。データの蓄積が今後の課題になることを留意する必要がある。

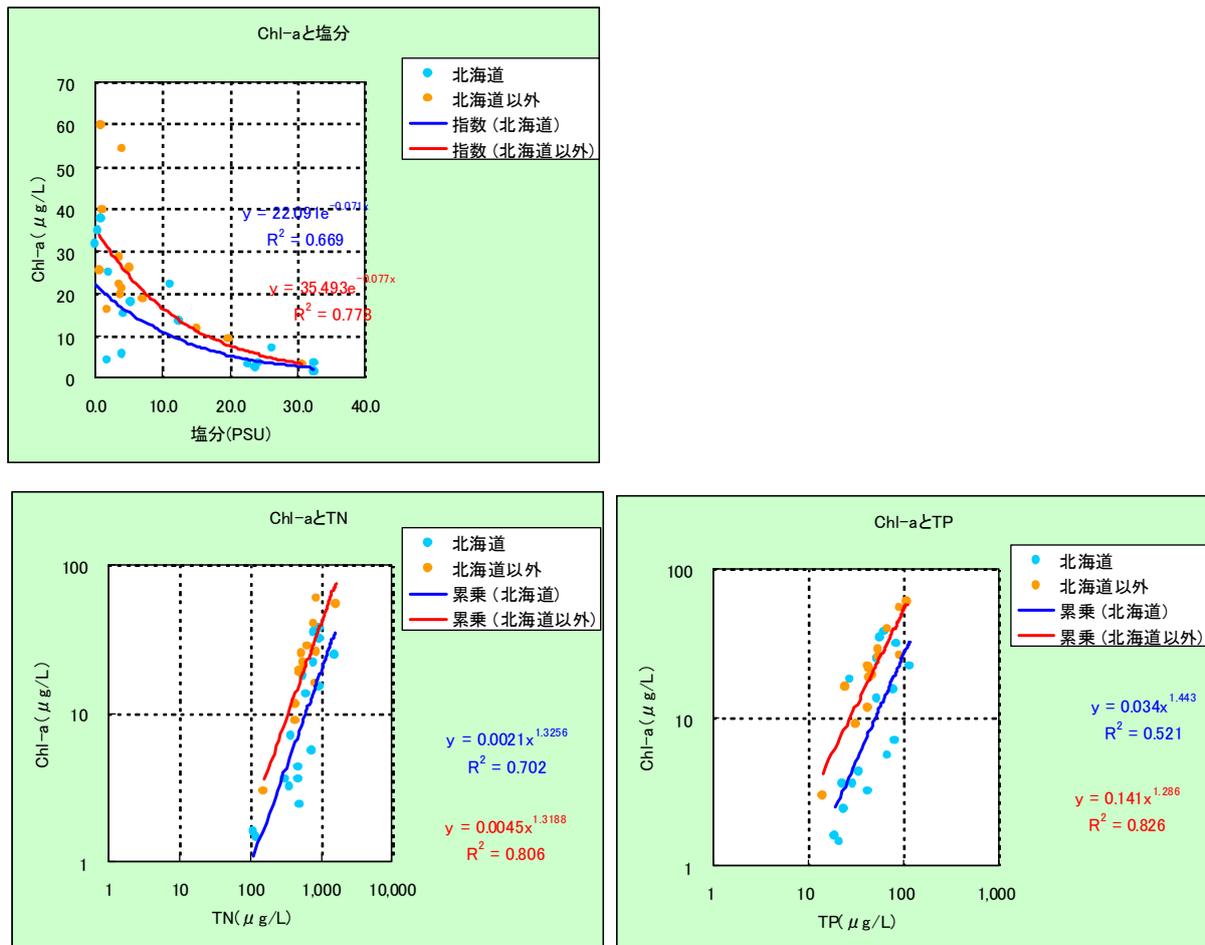


図 2.2.4-12 汽水湖のクロロフィル a (Chl-a) と塩分・全窒素(TN)・全リン(TP)の関係

なお、福島ら(1986)^{※1}によると湖内の内部生産が滞留時間と非線形な関わり（滞留時間が大きくなると内部生産 COD も多くなる傾向（図 2.2.4-13））があるとともに、クロロフィル a と内部生産 COD の関係があること（図 2.2.4-14）を示している。

このことから湖内の内部生産等を把握する際には滞留時間等にも着目する必要があることがあると考えられる。ただし汽水湖では滞留時間が海水の侵入によって異なること、上流に湖沼を抱えるところでは上流の湖沼で内部生産されたものが流入してくることから、検討を行う際には、それらに留意することが必要であると考えられる。

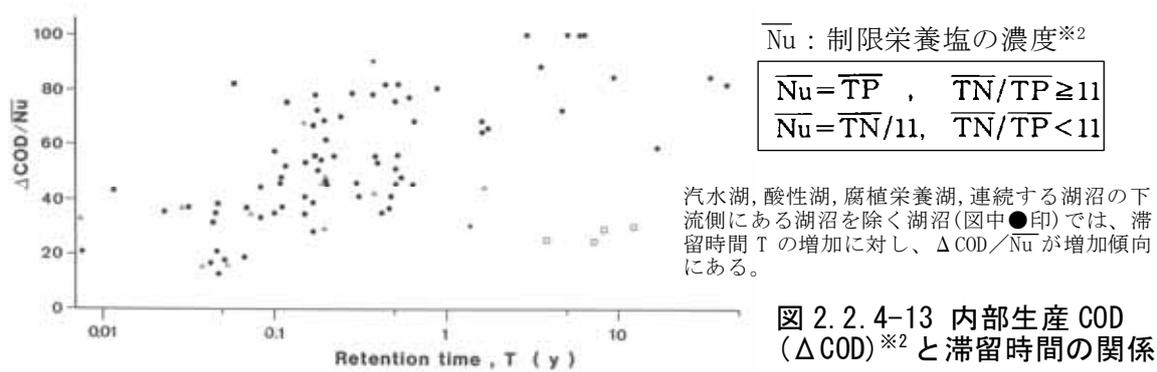


図 2.2.4-13 内部生産 COD (ΔCOD)^{※2}と滞留時間の関係^{※1※3}

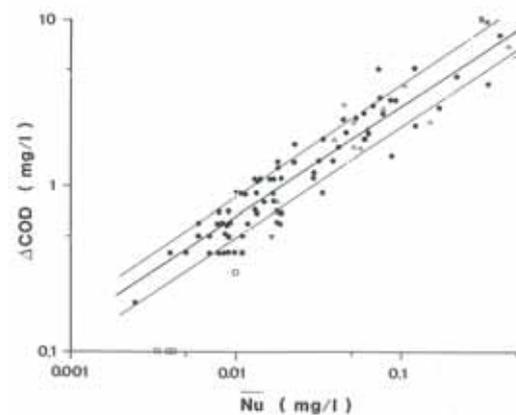


図 2.2.4-14 内部生産 COD^{※2}とクロロフィル a (Chl-a) 平均値の関係^{※1※3}

※1: 福島武彦, 天野耕二, 村岡浩爾(1986)「湖沼水質の簡易な予測モデル 2. 湖水栄養塩濃度と内部生産 COD、クロロフィル a との関係」日本水環境学会, 水質汚濁研究 第9巻 第12号, PP775~785.

※2: 縦軸が ΔCOD/Nu、横軸が滞留時間 T(年)を示す。ΔCOD は内部生産 COD を示す。Nu は制限栄養塩の濃度を示しており、全窒素(TN)、全リン(TP)の平均値に応じ、図 2.2.4-13 の右上枠内の式で換算したものである。

※3: 図 2.2.4-13~14 の対象湖沼

- | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. L./bashiri [▲] | 25. L.Inawashiro [△] | 49. L.Toyanoyata | 73. R.Sakamoto |
| 2. L.Shikotsu | 26. L.Hibara | 50. L.Kibagata | 74. L.Tanegaikie |
| 3. L.Tōya [△] | 27. L.Onogawa [○] | 51. L.Shibayamagata | 75. L.Koyamaikie [▲] |
| 4. L.Ōnuma | 28. L.Akimoto [○] | 52. L.Kahckugata | 76. L.Tōgōike [▲] |
| 5. L.Akan [■] | 29. L.Sohara | 53. L.Kitagata [▲] | 77. L.Nakaumi [▲] |
| 6. L.Kussharo [▲] | 30. R.Hatori | 54. L.Mikatagoko | 78. L.Shinji [▲] |
| 7. L.Jūsan [▲] | 31. R.Tagckura [○] | 55. L.Yamanaka | 79. L.Jinzai [▲] |
| 8. L.Tamoginuma | 32. R.Okutadani | 56. L.Kawaguchi | 80. L.Kojima |
| 9. L.Ichiyanaginuma | 33. L.Kasumigaura | 57. L.Saiko | 81. R.Sugano |
| 10. L.Towada | 34. L.Kitaura | 58. L.Shōji | 82. L.Tokiwa |
| 11. L.Ogawara [▲] | 35. L.Hitachitone [○] | 59. L.Motosu | 83. R.Kanogawa |
| 12. R.Gandō | 36. L.Hinuma [▲] | 60. L.Suwa | 84. R.Kurose |
| 13. R.Tooyosawa | 37. R.Kawamata | 61. L.Aoki | 85. R.Yanase |
| 14. R.Kurikoma | 38. R.Ikari | 62. L.Nakatsuna [○] | 86. R.Hyūgami |
| 15. R.Hanayama | 39. L.Yunoko | 63. L.Kizaki | 87. R.Hokuzan |
| 16. R.Naruko | 40. L.Chūzenji | 64. L.Nojiri | 88. R.Ryūmon |
| 17. R.Urushizawa | 41. L.Akagiōnuma | 65. L.Sanaru | 89. L.Unagiike |
| 18. R.Kamafusa | 42. L.Haruna | 66. L.Aburagafuchi [▲] | 90. L.Ikeda |
| 19. R.Tarumizu | 43. L.Ozenuma [■] | 67. L.Biwako (N.B.) | 91. L.Biwako (S.B.) [○] |
| 20. R.Ōkura | 44. L.Inbanuma | 68. R.Sengari | |
| 21. L.Izunuma | 45. L.Teganuma | 69. R.Murō | |
| 22. L.Naganuma | 46. R.Sagami | 70. R.Sarudani | |
| 23. L.Tazawa [△] | 47. L.Ashinoko | 71. R.Kazaya | |
| 24. L.Hachirō | 48. R.Tanzawa | 72. R.Ikehara | |

- ▲印：汽水湖
- △印：酸性湖
- 印：腐植栄養湖
- 印：連続する湖沼の下流側にある湖沼

＜コラム 6＞ 湾内の塩分と水質の関係の例から見る汽水湖における海水希釈の可能性

図 C6-1 は博多湾の例であるが、内田ら(1994)^{※1}により公共用水域水質調査結果の年平均値データ(昭和60年～平成2年)を用いて水質相互間の関係性を整理したものである。

全窒素(TN)、全リン(TP)は沿岸の低塩分域から外海の高塩分域で右下がりの傾向(図 C6-1(1))にあり、CODは非線形であるが、同様に外海の高塩分域で低い傾向(図 C6-1(2))が見られている。またクロロフィル a (Chl-a)は COD に対して直線的な関係が見られることから(図 C6-1(3))、外海の高塩分域の方が低くなっている可能性が推測される。

これらのことを踏まえると、汽水湖から見れば、塩水遡上時に海水による湖内の栄養塩類濃度の希釈が見込まれると考えられる。

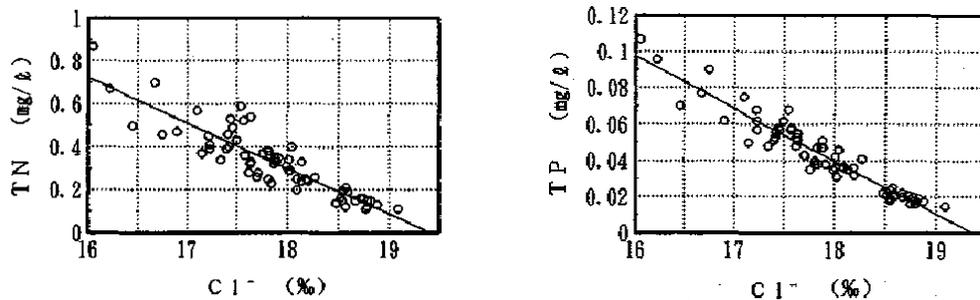


図 C6-1(1) 塩化物イオン(Cl⁻)と栄養塩類(左:全窒素(TN)、右:全リン(TP))の関係^{※1}

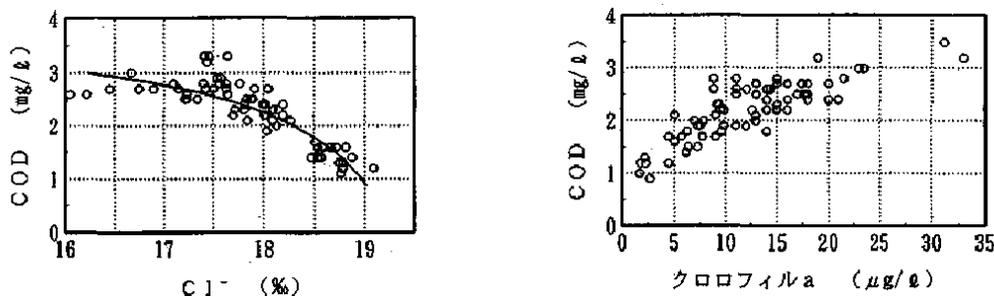


図 C6-1(2) 塩化物イオン(Cl⁻)と COD の関係^{※1} 図 C6-1(3) クロロフィル a (Chl-a) と COD の関係^{※1}

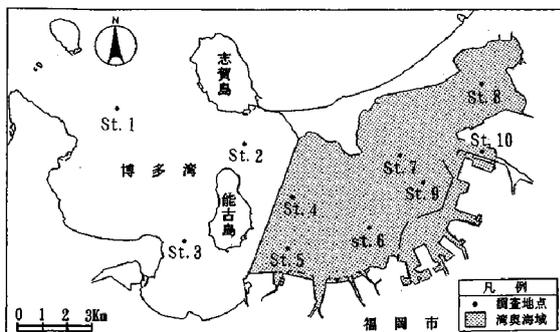


図 C6-1(4) 調査地点位置図^{※1}

※1:内田唯史, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘(1994)「富栄養化海域の水質の非線形特性とそのモデリングに関する研究」土木学会論文集 No. 503 II-29, PP187～195.

<コラム 7>汽水湖におけるポーレンバイダーモデルの当てはめ例とその適用性

湖沼の富栄養化を簡易的に予測する手法として、一般的にポーレンバイダーモデルが使われている。ポーレンバイダーモデルは、湖沼の平均水深と回転率の積、年間リン流入負荷量(単位湛水面積当たり)の関係から富栄養化を予測するものであり、その結果を図 C6-1 に示す図に当てはめて「富栄養化が生じる可能性の高い」区域、「富栄養化が生じる可能性の低い」区域、その中間の区域のどれに該当するかを見る。

ここでは、汽水湖と淡水湖で区分してポーレンバイダーモデルの当てはめを概略的に試行し、汽水湖水質保全に係る指標となるかどうかを検討した。今回は、流入リン負荷量について、文献等の既往検討結果により把握できる湖沼(汽水湖 5 つ、低標高に位置する淡水湖 6 つ)を対象に整理した。流入リン負荷量については、表 C7-1 に示すものを参考に設定した。ただし、宍道湖においては、負荷量の違いを見るために、原単位法、LQ 式によるものを双方使用した。また、汽水湖の回転率は、前述「2.2.3 湖内の水質特性 [2] 塩水遡上量の試算」の方法により試算した各湖の塩水遡上量、淡水流入量を勘案してを概算した。

そのポーレンバイダーモデルの結果については、図 C7-1 に示すとおり、対象とした汽水湖はほとんどが富栄養レベルにあり、標高の低い淡水湖と同様の位置に分布していた。

ただし汽水湖では上流からのみではなく下流からの負荷があり、また下流からの負荷は潮汐に伴って出入するため、リン流入負荷量算定は淡水湖より複雑である。しかも下流部が富栄養化した内湾や河口域である場合、下流からの負荷はポーレンバイダーモデルの結果に大きく左右することが想定される。

またここで使用したリン流入負荷量については、LQ 式によるものもあれば、原単位法によるものもあり、特に非特定汚染源による負荷量算出方法そのものに課題が残っているのが現状である。例えば、図 C7-1 中の A 湖の場合、原単位によるもの、LQ によるもので単年を対象としたもの、複数年の平均を適用したものの 3 ケースでリン負荷量を設定しプロットしているが、これらを見ると、 $\lambda = 0.03\text{mg/L}$ のライン上にあるもの～上側に位置するものと幅が大きく、差異が大きい。

さらにポーレンバイダーモデルはリン制限を前提として作成されているが、汽水湖はリン制限の傾向にある淡水湖と比べて N/P 比が小さく、海域のような窒素制限になる可能性がある(前述「[3] 汽水湖と淡水湖の水質比較」を参照)。

以上から汽水湖においては、ポーレンバイダーモデルが常に適用できるとは限らない。

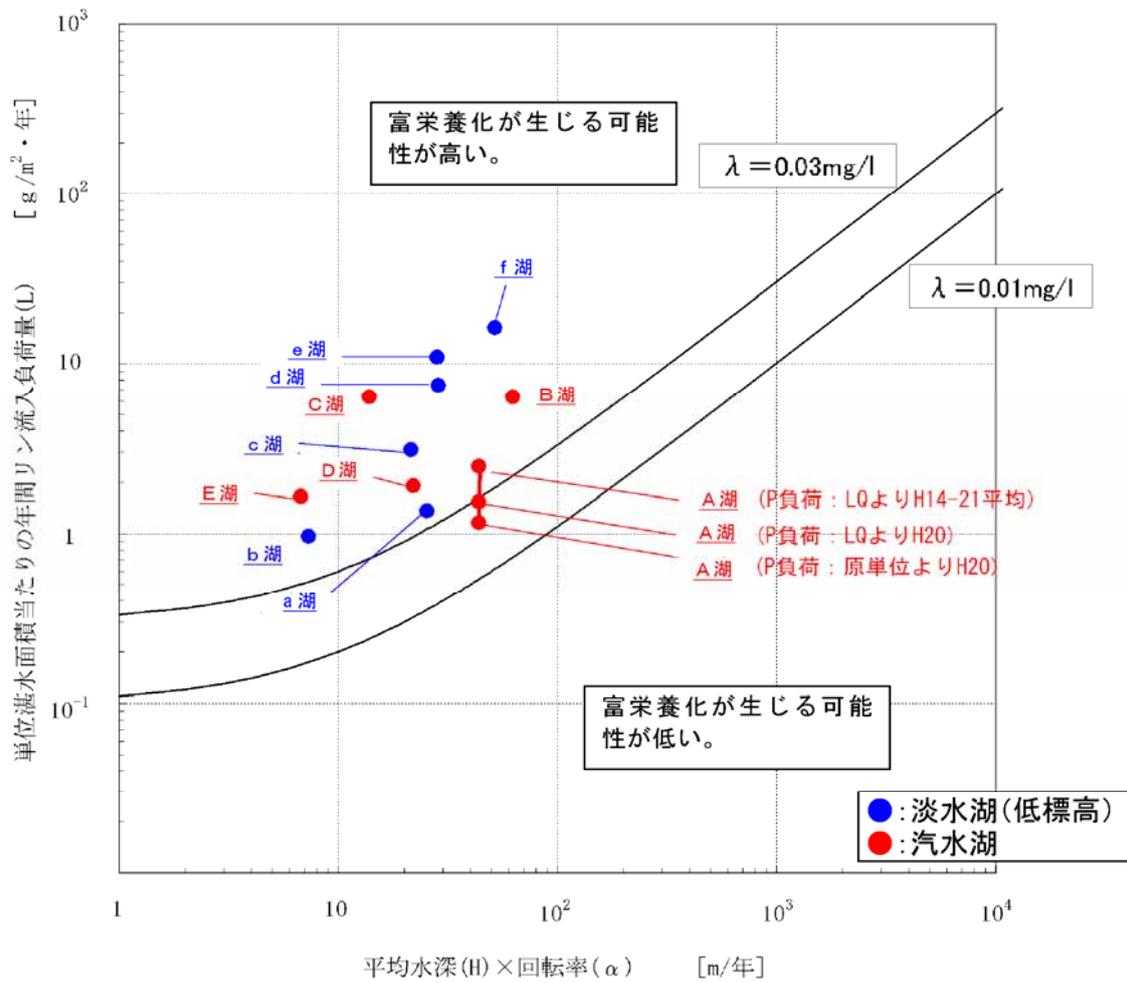


図 C7-1 ボーレンバイダーモデルの当てはめ例 (参考)

2.3 汽水湖の生物

2.3.1 汽水湖に生息する生物の特徴

汽水湖は海水と淡水が混合する場であり、生物にとっては海域や淡水域と全く異なる独自の生息場になっている。海域では塩分が比較的一定であり、淡水湖では塩分がほとんどないが、汽水湖では海水と淡水の混合度合いによって塩分が変化する。すなわち、汽水湖は塩分が時間的にも空間的にも変動が激しくなりやすく、そのような塩分変動は生物にとって大きな影響要因になる。

図 2.3-1 は塩分濃度と生物の種類の関係を示したものである(J. Hedgpeth, 1957)。移動能力に乏しい貝類や底生動物などは、塩分に応じた浸透圧調節を行う能力を求められるため、それに対応できる種が少なくなりやすい(種多様性が低い)。しかし、その環境に適応できる生物にとっては、餌資源を巡る他種との競争が少なく、汽水湖は流域から集積する栄養分を豊富に摂取しやすいことから、生物の生産性が高くなる。一方、移動性のある魚類や鳥類はそのような豊富な餌資源を入手できることから、生物の生産性が高くなるとともに、魚類などは塩分に応じて汽水湖に特有な種に加え、海産種あるいは淡水産種で構成されて変化に富む。

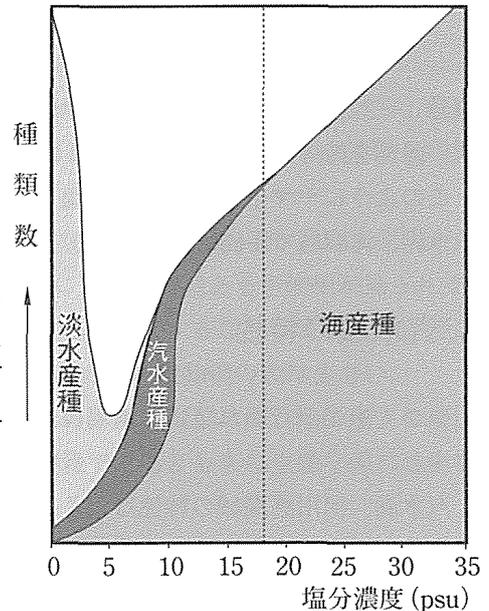


図 2.3-1 塩分と生物の種類の関係
※J. Hedgpeth(1957)

[1] 汽水湖に生息する生物

移動能力に乏しい水生植物や底生動物は、生活史の大部分を通じて同水域に生息している。表 2.3.1-1~2 に汽水湖でよく見られる大型植物、底生動物を示す。例えば底生動物では、シジミ等の貝類、コガイ等の多毛類、ミミズの仲間である貧毛類、エビやカニ等の甲殻類が見られている。

一方、移動能力の高い魚類や鳥類は汽水湖を一時的に利用する種が多く、淡水域よりも種類が多い場合もある。汽水湖に現れる魚類(表 2.3.1-3)の中でも海と淡水域を回遊する魚類、淡水域まで上らず汽水域に滞在する場合もある。また産卵域が海域にあるが、特定の時期に汽水域に進入して成長する種類もある。

鳥類(表 2.3.1-4)については、シギ、チドリ、サギ、カモなどが汽水湖で見られており、それらの多くは夏鳥や冬鳥、旅鳥として一時的に汽水域に滞在するものが大部分である。秋山(1988)^{*1}によると、このような鳥類は汽水域で高密度に生息する二枚貝や多毛類などの底生動物を摂食して栄養状態の維持や回復を図っている。

なお、汽水湖に生息・生育する主な底生動物、魚類、植生について、「自治体アンケート」より得られた情報を表 2. 3. 1-5 に示す。

※1: 秋山章男(1998)「干潟の鳥類 (栗原康編著, 河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー)」東海大学出版会, PP98~108.

表 2. 3. 1-1 汽水湖で見られる大型植物

分類群	属名	種名	和名
大型藻類			
緑藻類	<i>Enteromorpha</i>	<i>E. prolifera</i> <i>E. compressa</i> <i>E. intestinalis</i>	スジアオノリ ヒラアオノリ ボウアオノリ
紅藻類	<i>Caloglossa</i>	<i>C. ogasawaraensis</i>	ホソアヤギヌ
抽水植物			
イネ科	<i>Phragmites</i> <i>Zizania</i>	<i>P. australis</i> <i>Z. latifolia</i>	ヨシ マコモ
ガマ科	<i>Typha</i>	<i>T. angustata</i>	ヒメガマ
沈水植物			
ヒルムシロ科	<i>Potamogeton</i> <i>Ruppia</i>	<i>P. pectinatus</i> <i>P. perfoliatus</i> <i>R. maritima</i> <i>R. cirrhosa</i> <i>R. truncatifolia</i>	リュウノヒゲモ ヒロハノエビモ カワツルモ ネジリカワツルモ ヤハズカワツルモ
アマモ科	<i>Zostera</i>	<i>Z. japonica</i>	コアマモ
イトクズモ科	<i>Zannichellia</i>	<i>Z. palustris</i>	イトクズモ

表 2. 3. 1-2 汽水湖で見られる大型底生動物*

分類群/和名	種名
尋常海綿類	
シロカイメン	<i>Spongilla alba</i>
多毛類	
ゴカイ	<i>Neanthes japonica</i>
イトメ	<i>Tylorrhynchus heterochaetus</i>
ヤマトスピオ	<i>Prionospio japonica</i>
イトゴカイ科	<i>Notomastus</i> sp., <i>Heteromastus</i> sp.
貧毛類	<i>Limnodrilus</i> spp.
腹足類(巻貝)	
イシマキガイ	<i>Clithon retropictus</i>
エドガワミズゴマツボ	<i>Stenothyra edogawaensis</i>
カワザンショウガイ	<i>Assiminea lutea japonica</i>
カワグチツボ	<i>Fluviocingula nipponica</i>
斧足類(二枚貝)	
ヤマトシジミ	<i>Corbicula japonica</i>
マガキ	<i>Crassostrea gigas</i>
アサリ	<i>Ruditapes philippinarum</i>
ホトギスガイ	<i>Musculus senhausia</i>
甲殻類	
ヨーロッパフジツボ**	<i>Balanus improvisus</i>
ドロフジツボ**	<i>Balanus kondakovi</i>
ニホンドロソコヨコエビ	<i>Grandidierella japonica</i>
イソコツブムシ	<i>Gnorimosphaeroma rayi</i>
モクズガニ	<i>Eriocheir japonicus</i>
チゴガニ	<i>Ilyoplax pusilla</i>
スジエビ	<i>Palaemon paucidens</i>
テナガエビ	<i>Macrobrachium nipponense</i>
昆虫類	
モンユスリカ亜科	Tanypodinae Gen. spp.

*人が入って立てる程度の深さまで普通に採集できる可能性の高い動物に限る。

**浜名湖では最近15年間でタテジマフジツボ(*B. amphitrite*)とアメリカフジツボ(*B. ebumeus*)に交代した(岡本, 1995)。

※山室真澄(1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八束・奥田節夫 編) 第II部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP110~113.

表 2.3.1-3 汽水湖で見られる魚類

目名	科名	和名	種名	主な生息域	産卵域
コイ目	コイ科	ウグイ	<i>Tribolodon hakonensis</i>	汽水・淡水	淡水
ニシン目	ニシン科	サツパ	<i>Sardinella zunasi</i>	汽水・海	汽水・海
	コノシロ亜科	コノシロ	<i>Konosirus punctatus</i>	汽水・海	海
ウナギ目	ウナギ科	ウナギ	<i>Anguilla japonica</i>	回遊	海
サケ目	キュウリウオ科	ワカサギ	<i>Hypomesus nipponensis</i>	汽水・海	汽水・海
	アユ科	アユ	<i>Plecoglossus altivelis</i>	回遊	淡水
	シラウオ科	シラウオ	<i>Salangichthys microdon</i>	汽水	汽水
ダツ目	ダツ科	ダツ	<i>Strongylura anastomella</i>	汽水・海	海
	サヨリ科	クルマサヨリ	<i>Hyporhamphus intermedius</i>	汽水	汽水
スズキ目	ボラ科	ボラ	<i>Mugil cephalus cephalus</i>	汽水・海	海
	スズキ科	スズキ	<i>Lateolabrax japonicus</i>	汽水・海	海
	ヒイラギ科	ヒイラギ	<i>Leiognathus nuchalis</i>	汽水・海	海
	シマイサキ科	シマイサキ	<i>Rhynchopelatus oxyrhynchus</i>	汽水・海	海
	タイ科	クロダイ	<i>Acanthopagrus schlegeli</i>	汽水・海	海
	ハゼ科	ヨシノボリ	<i>Rhinogobius</i> spp.	回遊	淡水
		マハゼ	<i>Acanthogobius flavimanus</i>	汽水	汽水
ビリンゴ		<i>Chaenogobius castaneus</i>	汽水	汽水・海	
フグ目	フグ科	チチブ	<i>Tridentiger obscurus</i>	汽水	汽水
		クサフグ	<i>Takifugu niphobles</i>	汽水・海	海

注:移入種については、普通にみられるものも除外した。

※山室真澄(1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八東・奥田節夫 編) 第Ⅱ部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP110~113.

表 2.3.1-4 汽水湖で見られる鳥類

科名	和名	種名	生息型	
カイツブリ科	カイツブリ	<i>Podiceps ruficollis</i>	冬鳥	
	カンムリカイツブリ	<i>Podiceps cristatus</i>	冬鳥	
	ハジロカイツブリ	<i>Podiceps nigricollis</i>	冬鳥	
ウ科	カワウ	<i>Phalacrocorax carbo</i>	留鳥	
サギ科	ゴイサギ	<i>Nycticorax nycticorax</i>	留鳥	
	アマサギ	<i>Bubulcus ibis</i>	夏鳥	
	ダイサギ	<i>Egretta alba</i>	留鳥	
	チュウサギ	<i>Egretta intermedia</i>	夏鳥	
	コサギ	<i>Egretta garzetta</i>	留鳥	
	アオサギ	<i>Ardea cinerea</i>	留鳥	
	ガンカモ科	マガモ	<i>Anas platyrhynchos</i>	冬鳥
カルガモ		<i>Anas poecilorhyncha</i>	留鳥	
ヨシガモ		<i>Anas falcata</i>	冬鳥	
ヒドリガモ		<i>Anas penelope</i>	冬鳥	
オナガガモ		<i>Anas acuta</i>	冬鳥	
シマアジ		<i>Anas querquedula</i>	旅鳥	
ハシビロガモ		<i>Anas clypeata</i>	冬鳥	
ホシハジロ		<i>Aythya ferina</i>	冬鳥	
キンクロハジロ		<i>Aythya fuligula</i>	冬鳥	
スズガモ		<i>Aythya marila</i>	冬鳥	
ホオジロガモ		<i>Bucephala clangula</i>	冬鳥	
ミコアイサ		<i>Mergus albellus</i>	冬鳥	
カワアイサ		<i>Mergus merganser</i>	冬鳥	
ワシタカ科		チュウヒ	<i>Circus aeruginosus</i>	冬鳥
		ミサゴ	<i>Pandion haliaetus</i>	留鳥
ハヤブサ科		ハヤブサ	<i>Falco peregrinus</i>	留鳥
クイナ科		クイナ	<i>Rallus aquaticus</i>	留鳥
	ヒクイナ	<i>Porzana fusca</i>	夏鳥	
チドリ科	バン	<i>Gallinula chloropus</i>	留鳥	
	コチドリ	<i>Charadrius dubius</i>	夏鳥	
	シロチドリ	<i>Charadrius alexandrinus</i>	留鳥	
	メダイチドリ	<i>Charadrius mongolus</i>	旅鳥	
	ムナグロ	<i>Pluvialis dominica</i>	旅鳥	
シギ科	ダイゼン	<i>Pluvialis squatarola</i>	旅鳥	
	タゲリ	<i>Vanellus vanellus</i>	冬鳥	
	トウネン	<i>Calidris ruficollis</i>	旅鳥	
	ハマシギ	<i>Calidris alpina</i>	旅鳥・冬鳥	
	オバシギ	<i>Calidris tenuirostris</i>	旅鳥	
	ツルシギ	<i>Tringa erythropus</i>	旅鳥	
	アオアシシギ	<i>Tringa nebularia</i>	旅鳥	
	クサシギ	<i>Tringa ochropus</i>	旅鳥・冬鳥	
	タカブシギ	<i>Tringa glareola</i>	旅鳥	
	キアシシギ	<i>Tringa brevipes</i>	旅鳥	
	イソシギ	<i>Tringa hypoleucos</i>	旅鳥・冬鳥	
ツバメチドリ科	チュウシャクシギ	<i>Numenius phaeopus</i>	旅鳥	
	タシギ	<i>Gallinago gallinago</i>	旅鳥・冬鳥	
カモメ科	ツバメチドリ	<i>Glareola maldivarum</i>	旅鳥	
	ユリカモメ	<i>Larus ridibundus</i>	冬鳥	
	カモメ	<i>Larus canus</i>	冬鳥	
	ウミネコ	<i>Larus crassirostris</i>	留鳥	
	アジサシ	<i>Sterna hirundo</i>	旅鳥	
セキレイ科	コアジサシ	<i>Sterna albifrons</i>	夏鳥	
	ハクセキレイ	<i>Motacilla alba</i>	留鳥	

※山室真澄(1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八東・奥田節夫 編) 第Ⅱ部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP110~113.

表 2.3.1-5 生息・生育する主な魚類・底生動物・植生の情報聴取結果

道県	湖沼	主な生息種・生育種		
		底生動物	魚類	水草・海藻
北海道	ポロ沼	シジミ	イトウ	コアマモ
	クッチャロ湖	ヤマトシジミ	ワカサギ	不明
	サロマ湖	ホタテ,カキ,ウニ,エビ	サケ,マス,カレイ類,チカ,キュウリ,コ マイ	不明
	能取湖	ホタテガイ,マカキ,ホッカイエビ,ヒト テ,エゾハフンウニ,マナコ,アサリ	カレイ類,ニシン,チカ,キュウリウオ	アマモ,スケアマモ,コアマモ ただし、極めて少ない。
	網走湖	ヤマトシジミ,スジエビ,モクスガニ	ワカサギ,シラウオ,ハゼ類,カワヤツ メ,キンブナ,サクラマス,サケ,イトヨ, ニシン,チカ等	不明
	トウフツ湖	カキ,スジエビ	ワカサギ,ニシン	不明
	風蓮湖	ツツ,ホッキガイ,アサリ,シジミ,ウニ, マカキ等	ワカサギ,ニシン,カレイ,マス,シラウ オ,サケ,ハタハタ等	テンゴサ
	厚岸湖	カキ,アサリ	カレイ,ニシン,マツカワ	不明
	春採湖	スジエビ,ウチダサリガニ等	ワカサギ,ジュスカケハゼ,キンブ ナ,ウグイ,イハラトミヨ,ヌマチチブ 等	不明
	ホロカヤント沼	不明	ワカサギ	不明
	パンケ沼(天塩)	ヤマトシジミ	不明	不明
青森県	十三湖	ヤマトシジミ	ススキ,チヌ	不明
静岡県	浜名湖	アサリ,クルマエビ等	ウナギ,アナゴ,ホラ,ススキ,マダ イ,マハゼ等	アマモ,オゴノリ 沿岸部全体
	佐鳴湖	モスクガニ,テナガエビ,イシマキガ イ,モノアラガイ,コカイ,ユスリカ類 等	ウナギ,コイ,フナ,マハゼ,ヌマチチブ 等	あまり分布していない。
愛知県	油ヶ淵	不明	不明	ホリキノフリモ,オオカナダモ,ホテイア オイ,アオウキクサ,オオサンショウモ
石川県	河北潟	タニシ,イトミミズ,テナガエビ	タイリクバラタナゴ,オイカワ,キンブ ナ,ブルーギル,ススキ	あまり分布していない。
鳥取県	湖山池	トフガイ,イシガイ,タニシ,テナガエ ビ等	コイ,フナ,ワカサギ,シラウオ,ススキ, ブルーギル等	ヒシ,ガマ,ヨシ,マツモ
	東郷池	ヤマトシジミ,テナガエビ,モクスガ ニ等	ウナギ,コノシロ,フナ,コイ,ナマス,ア ユ,シラウオ,サケ等	マツモ,ホザキノフサモ,エビモ
鳥取県 島根県	中海	アサリ,サルホウガイ,ホトキスガ イ,エビ類等	ススキ,ホラ,マハゼ,コノシロ,クロソ イ等	ホソジュスモ,アオサ,ウミトラノオ,ア マモ,コアマモ,オゴノリ等
島根県	宍道湖	ヤマトシジミ	シラウオ,ススキ,フナ,ウナギ,マハ ゼ	シオクサ,オオササエビモ,ヨシ等
	神西湖	ヤマトシジミ	ホラ,エビ,フナ,ウナギ,マハゼ	不明

※1:「自治体アンケート」に基づく

環境省では自然環境保全基礎調査の一環として、日本沿岸の海藻藻場・海草藻場に関する浅海域生態系調査(藻場調査)を実施しており、その調査箇所には汽水湖も含まれている。表 2.3.1-6 は環境省(2008)「第7回自然環境保全基礎調査」における汽水湖の藻場調査結果である。

これらを見るとアマモ、コアマモで構成されている藻場が多く見られている。またサロマ湖や能取湖では日本の固有種であり、国内でも比較的限られて分布するスゲアマモも生育している。

表 2.3.1-6 汽水湖の浅海域生態系調査(藻場調査)結果

汽水湖	藻場の出現種(優占種)	備考
サロマ湖	アマモ、スゲアマモ、コアマモ	優占種は岸からアマモ、数十m沖からスゲアマモが密に生育。スゲアマモは日本の固有種であり、国内でも比較的限られて分布。
能取湖	コアマモ、アマモ、スゲアマモ	左記の種が混合して分布
瀧沸湖	コアマモ、アマモ	コアマモが優占。
風蓮湖	アマモ、コアマモ	大部分はアマモが占め、コアマモが潮間帯をパッチ上に生育。
温根沼	アマモ	
火散布沼	アマモ、コアマモ	藻場は河口を除く全域で概ね見られる。湖奥はアマモが優占。
厚岸湖	アマモ	湖心にアマモが藻場を形成。コアマモは湖周辺の浅水域に広く見られる。過去には養殖場造成の埋立のためにアマモ場が消失している。
湧洞沼	コアマモ	湖岸に沿った浅場に生育。
浜名湖 (中之郷)	アマモ	
大橋川～中海	大橋川から上流:コアマモ 境水道:オゴノリ類等	境水道はほとんどが枯死し、被度が10～20%と少ない。
海鼠池	マメタワラが優占するガラモ場に アマモ場が混在	湖岸に沿った水深50cm～8mの範囲に生育。湖内にはカワツルモも生育。
貝池	アミジグサ科藻類、オゴノリ類	

※環境省自然環境局(2008)「第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査(藻場調査)報告書」

[2] 汽水湖の底生動物や植物プランクトン

(1) 底生動物

底生動物は移動能力に乏しいことから、その生息場の水質や堆積物の質による影響を大きく受けやすく、特に浸透圧調節能力の程度によって水質の中でも塩分が大きな影響要因になりやすい。ここでは汽水湖に広く分布しているゴカイ(多毛類)やヤマトシジミ(貝類)の仲間が塩分に対応してどのように分布しているかをとりまとめた。

汽水湖に生息する多毛類と貝類は広い塩分耐性を示す広塩性種と、狭い塩分耐性を示す狭塩性種に区分され、さらに狭塩性種には低塩分にしか棲めない低鹹性汽水種と、高塩分にしか棲めない高鹹性汽水種に分かれる(図 2.3.1-2)。

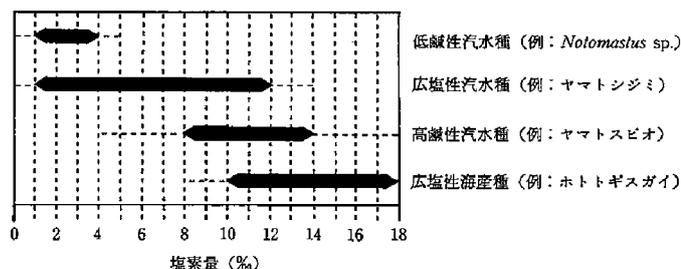
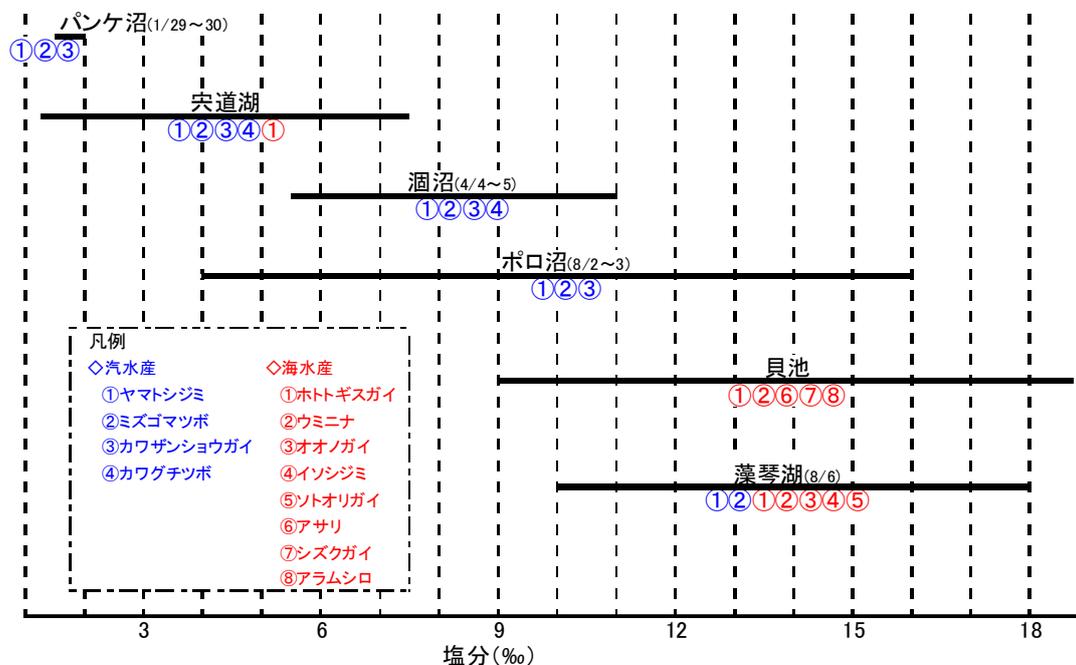


図 2.3.1-2 汽水湖に生息する底生動物の塩分に対する分布

※山室真澄(1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八東・奥田節夫 編) 第II部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP154.

図 2.3.1-3 は山室(1986)^{※1}がとりまとめた生息が確認されている貝類

相とその汽水湖の塩分の例である。これを見ると汽水産と海水産が塩分で異なっており、広塩性汽水種のヤマトシジミは塩分の低い方で幅広く、広塩性海水産種のホトトギスガイは高い方で幅広く生息していると考えられる。



※図中の月日は調査時期を示す。

図 2.3.1-3 生息が確認されている貝類相とその汽水湖の塩分の例

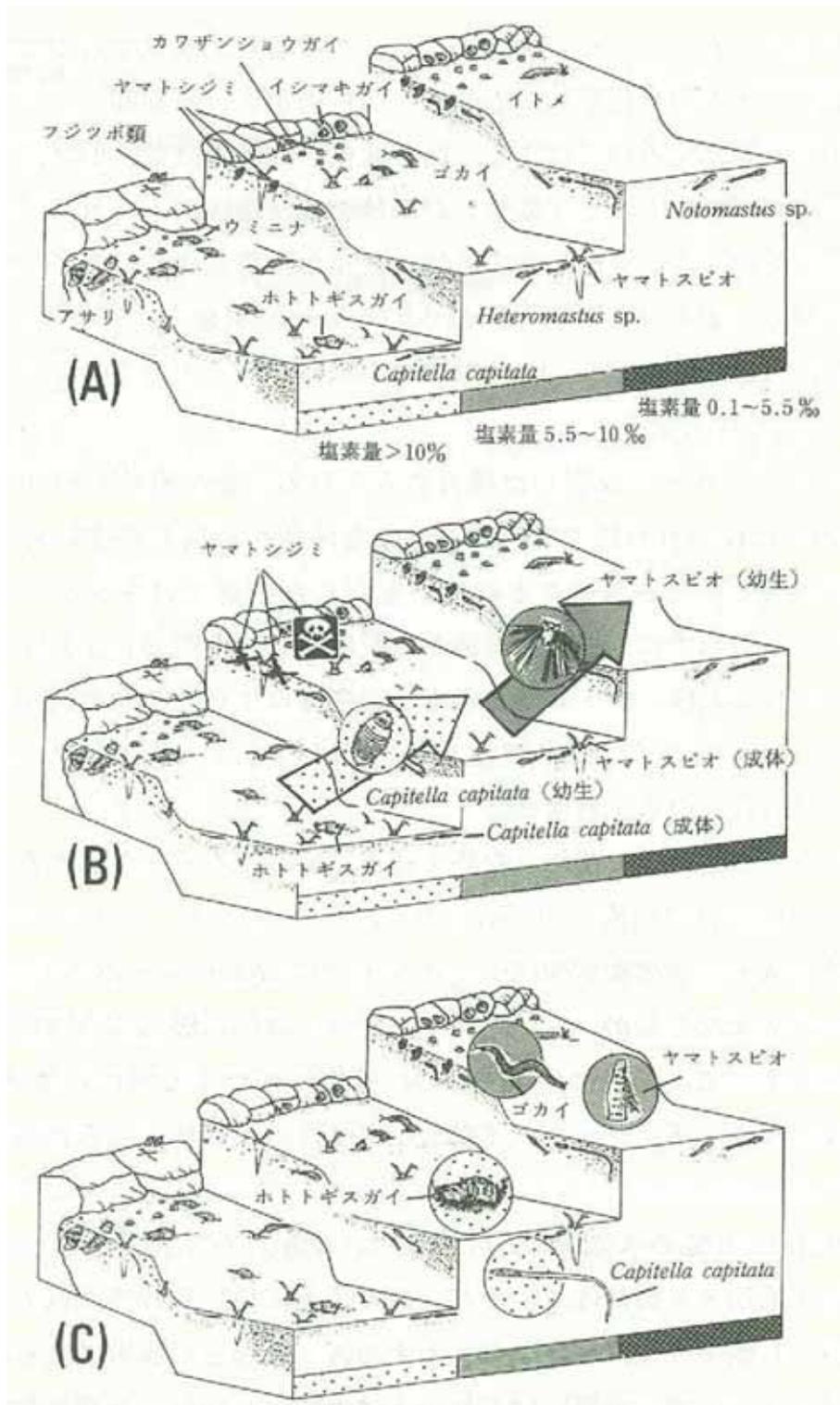
※山室真澄(1986)「日本の汽水性海跡湖における多毛類・貝類の分布とそれを規定する環境条件」PP82.

ただし、汽水湖の塩分は同じ場所でも常に一定であるとは限らない。底生動物の分布もその変動に応じて変わってくる。そこで底生動物の分布が環境変化に応じて形成される過程を模式化したものを図 2.3.1-4 に示す。

図 2.3.1-4 中(A)から(B)の変化を見ると、塩分耐性が海水の濃度まで達していないヤマトシジミが死滅している。逆に高塩分水が遡上するときに浮遊幼生がいれば、その高塩分水に乗ってより上流の水域にまで生息分布を広げることができる。高塩分水はまず上流域の深部に達するが、やがて浅部にも達するようになり、幼生の浅部への到達も容易になる。

高塩分水の遡上が終わった図中(C)では、低塩分にも耐えられるゴカイやヤマトスピオがある程度生き残っている。ホトトギスガイや *Capitella capitata* といった高塩分水が成層してやや貧酸素化しても生息できる海産種は、下から二段目のところまで出現し、生息範囲を拡大している。

一方、(B)のところで死滅したヤマトシジミは、次の繁殖期に上流域から流されてくる浮遊幼生による再生が期待できる。しかし、上流からの供給がなければ、次第に底生動物相が単純になってくる。



(A) “原型的”動物群集。
 (B)高塩分水の遡上による動物の死滅と、浮遊幼生の低塩分域への拡散。拡散する浮遊幼生を特に誇張して描いた。矢印は高塩分水の遡上を示す。
 (C)高塩分水の遡上後数カ月を経た動物群集。高塩分水の遡上によって低塩分域に拡散・定着した成体を特に誇張して描いた。

図 2.3.1-4 汽水湖の底生動物の生息分布と環境変化の関係

※山室真澄(1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八束・奥田節夫 編) 第II部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP156.

(2) 植物プランクトン

各汽水湖における植物プランクトンについて、環境省(1993)「第4回自然環境保全基礎調査 全国湖沼調査(全国版)」ではその湖沼における第1優占種、第2優占種、その他確認された種でとりまとめている。その確認種数について、類区分構成比を図2.3.1-5に示す。また、参考として代表的な淡水湖の状況も併記する。

これによると、汽水湖では全般的に珪藻類が多く確認されている。富栄養型の湖沼であるが、クッチャロ湖、サロマ湖、東郷池などは珪藻類がほとんどであり、加茂湖などで珪藻類と渦鞭毛藻類が見られている。

一方藍藻類が確認されている汽水湖は、涸沼や佐鳴湖、湖山池、宍道湖、水月湖といった富栄養型湖沼で見られており、これらは塩分濃度が比較的低い傾向にある。また小川原湖では、緑藻類に優占種が見られていた。

比較対象として図2.3.1-5に併記した富栄養型の淡水湖の霞ヶ浦、手賀沼、諏訪湖では藍藻類が優占していた。

このようなことから、淡水から海水に変化するにつれ藍藻類・緑藻類の多い状態から珪藻類・渦鞭毛藻類の多い状態になっていると考えられる。

なお、植物プランクトンと塩分の関係については「**4.3 汽水湖の対策等を行う際に参考とするための指標**」で後述する。

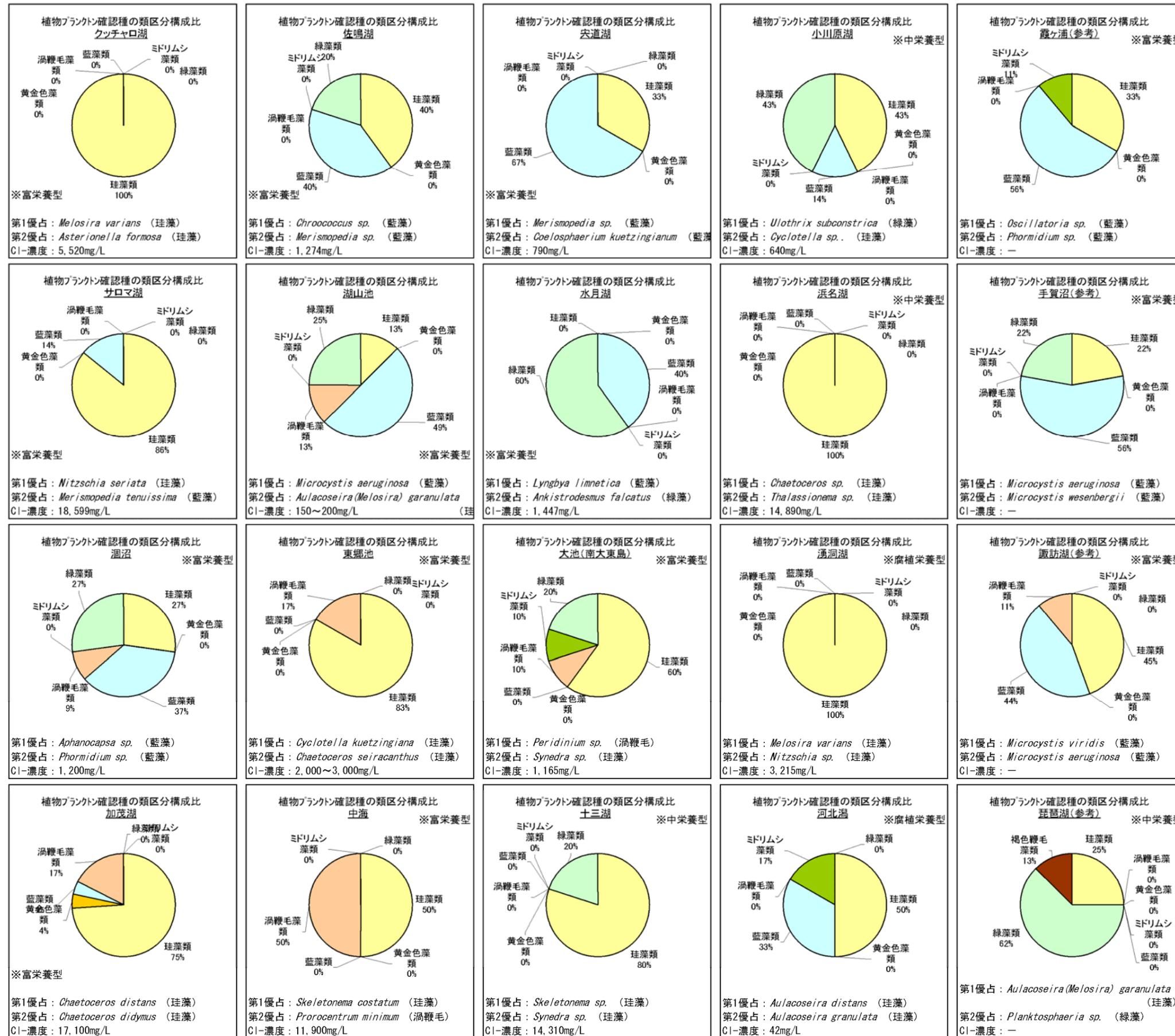


図 2.3.1-5 植物プランクトン確認種の類区分構成比
 ※環境省自然保護局(1993)「第4回自然環境保全基礎調査 湖沼調査報告書(全国版)」のデータに基づき作成。

2.3.2 汽水湖の生産力

汽水湖では流域の最下流に位置することから、有機物や栄養塩類等が多く集積しやすい。

そのような中、移動能力に乏しい貝類や底生動物、動植物プランクトンなどは、塩分に対する浸透圧調節を行う能力を求められるため、汽水湖で生息・生育できる種類が少なくなるが、その環境（塩分）に適応できる生物にとっては、餌資源となる豊富な栄養塩類等を比較的低い競争率で入手できる。このため、それらは多量に生息・生育しやすくなり、高い生産性を維持しやすくなる。

一方、移動性のある魚類や鳥類は汽水湖に一時的に滞在するものが多く（魚類なら回遊途中、鳥類なら渡りの途中など）、例えば魚類などは塩分に応じて汽水湖に特有な種に加え、海産種あるいは淡水産種で構成されて変化に富む。さらにそれらは豊富な餌資源（魚類は植物プランクトン等、鳥類は貝類等）を入手できるので生産性が高くなる。

このようなことから汽水湖では生産性が比較的高いと考えられる。

[1] 生産と二次生産の生産力

Nixon (1988) は、淡水～海水の様々な水域における生産力を把握するために、各水域の一次生産量と二次生産量(漁獲量)の関係(図 2.3.2-1)を整理している。

一次生産とは光合成植物の増加による生物体有機物が増加することであり、植物プランクトン等が一次生産者になる。二次生産とは既存の有機物を摂取して有機物が増加することであり、魚貝類等が二次生産者になる。ただし、二次生産は様々な生物が関与することから、それを定量的に表現することが難しい。このため、Nixon(1988)は様々な水域を対象とし、二次生産を漁獲量で代用するとともに、一次生産との関係を図 2.3.2-1 に示すとおりとりまとめている。

その結果、Nixon(1988)は汽水域(図 2.3.2-1 中の●印、◆印)では漁獲量や一次生産量が他の水域より高いことを指摘している。

このように汽水域で一次生産が高い要因としては、一次生産に必要な窒素やリンなど栄養塩類等が汽水域に集積することとが挙げられる。また水中に懸濁する物質を摂食する生物(貝類等の懸濁物食者)にとっては、汽水域内で生産された一次生産物のみならず河川や海から供給される有機懸濁物質も餌として利用できる。さらに魚類や鳥類はそのような貝類等の懸濁物食者も捕食することにより生息している。また懸濁物食者が摂取した有機物の一部は分解され、栄養塩の形で水中に排泄され、再び一次生産に利用される。

汽水湖では、そのような一次生産と二次生産が直接結びつくことにより、双方ともに高い生産力を維持できる。

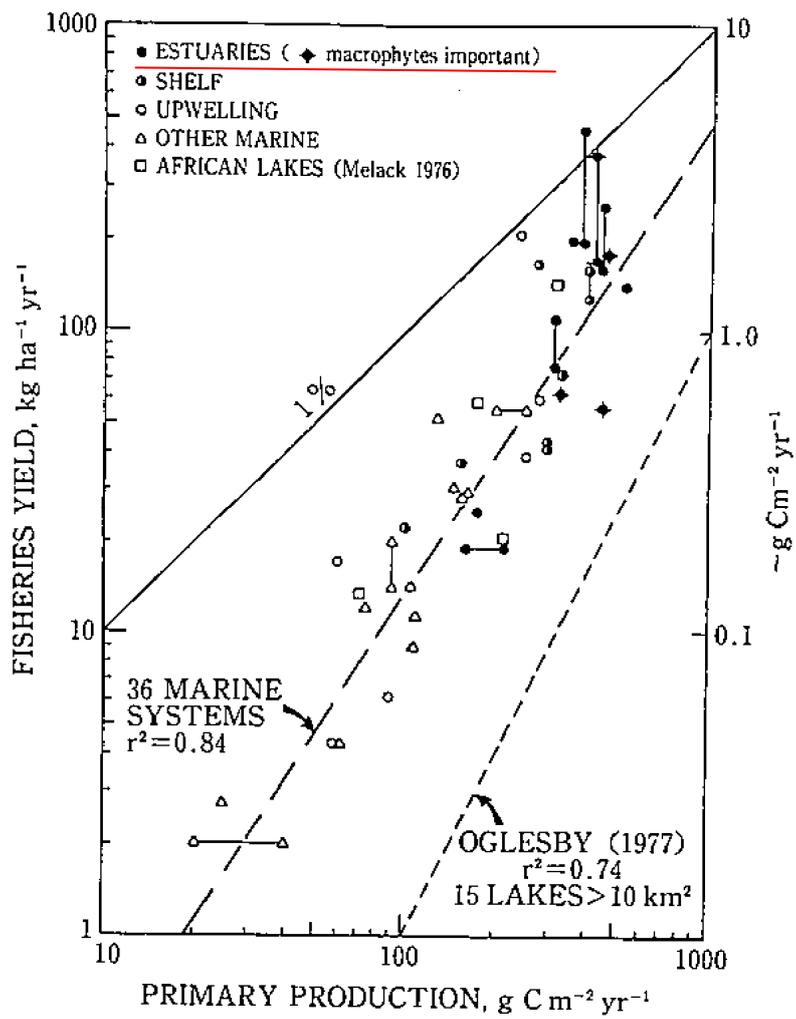


図 2.3.2-1 淡水～海水の様々な水域における単位面積当たりの年間漁獲量(縦軸)と一次生産量(横軸)の関係

(※Nixon, 1988)

[2] 漁獲量から見た汽水湖と淡水湖における生産性の比較

生産性を表現する一つとして漁獲量が挙げられる。そこで湖面積当たりの年間漁獲量を見ると、淡水湖は概ね 20t/年/km² 前後で推移しているが、汽水湖はそれら淡水湖より大きい湖沼が多い(図 2.3.2-2)。

なお、湖面積当たりの年間漁獲量が大きい汽水湖はシジミを主にしている十三湖、神西湖、宍道湖のほか、アサリやウナギ等を主にしている浜名湖などであった。

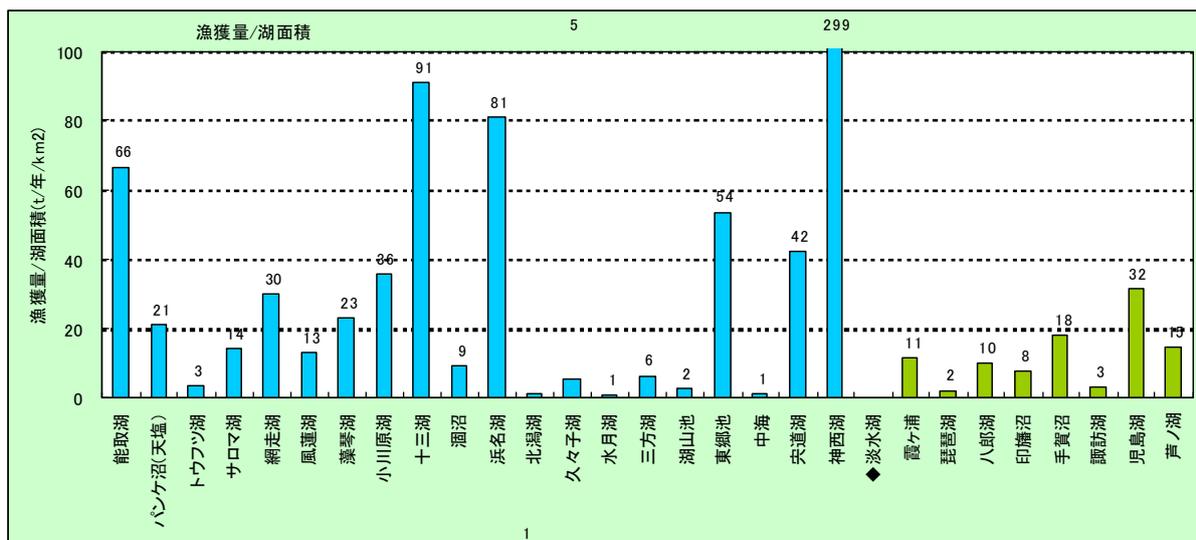


図 2.3.2-4 汽水湖と淡水湖の湖面積当たりの年間漁獲量

※汽水湖は原則として「自治体アンケート」に基づく。ただし、藻琴湖及び酒沼は、「漁業・養殖業生産統計年報(農水省)」の H18 年データに基づく。また、淡水湖も「漁業・養殖業生産統計年報(農水省)」より算出。なお、汽水湖の漁獲量(重量)には、シジミ等のような貝殻を含むものが多い。

また湖沼(汽水湖及び淡水湖)の湖面積当たりの漁獲量と栄養塩類(TN、TP)の関係について、図 2.3.2-3~4 に整理した。図 2.3.2-3 は昭和 55 年度のものであり、図 2.3.2-4 は「自治体アンケート」に基づくデータで更新したものである。

本図を見ると、多くの湖沼は TN、TP が高いほど漁獲量が多くなる傾向にあり、栄養塩類が水産資源にとって必要なものであることがわかる。ただし、手賀沼や鳥屋野潟などの淡水湖では TP が相関上の分布群から上方へ外れており、TP が多い割には漁獲量が比較的少ない範囲に位置している。手賀沼の場合、TN も同様に相関上の分布群から上方へ外れている。

一方、汽水湖においては、図 2.3.2-3~4 の双方で相関上の分布群から右方へ外れており、TN、TP が淡水湖と比べて少ない湖でも漁獲量が比較的多い範囲に位置していることが伺える。

このようなことから、汽水湖は生産力が比較的高い傾向にあると考えられる。

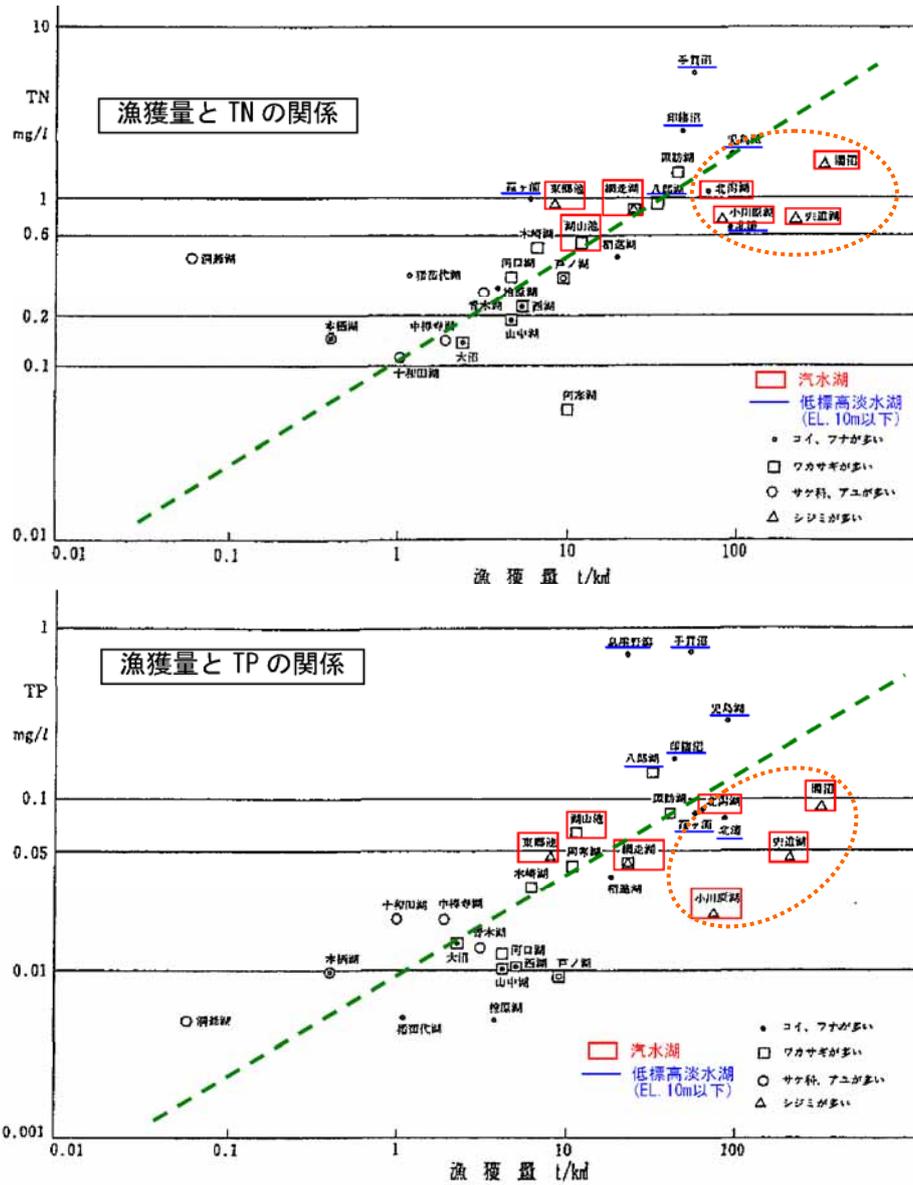


図 2.3.2-3 湖面積当たりの漁獲量と栄養塩類(TN, TP)の関係(汽水湖・淡水湖、昭和 55 年度)
 ※(社)日本水産資源保護協会(2013.1)「水産用水基準第7版(2012年版)」PP13.

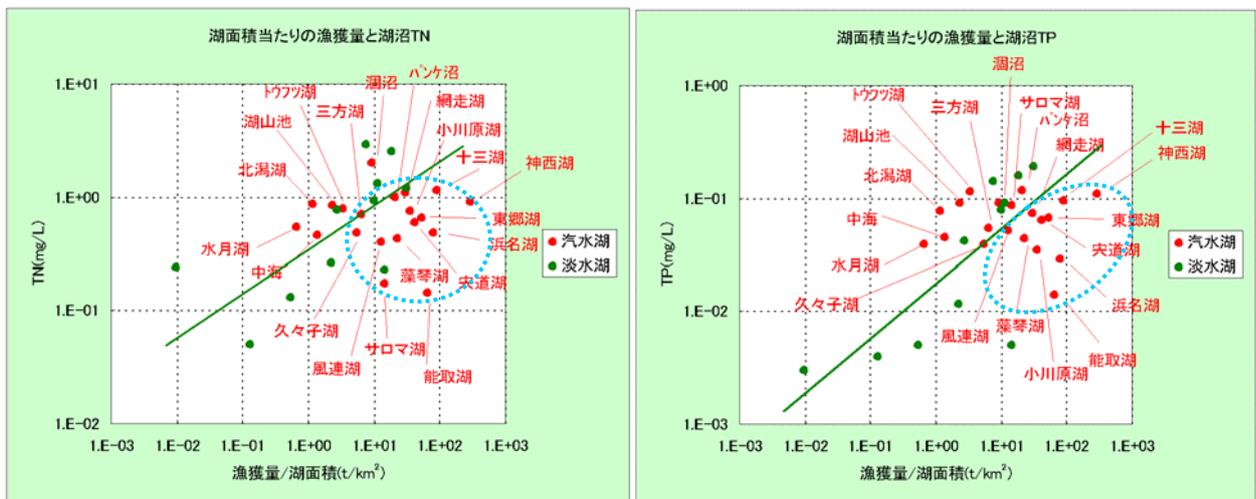


図 2.3.2-4 湖面積当たりの漁獲量と栄養塩類(TN, TP)の関係
 (汽水湖・淡水湖、更新版)

※漁獲量データ:「自治体アンケート」、漁業・養殖業生産統計年報(農林水産省)より
 ※水質データ:「自治体アンケート」、公共用水域水質測定結果(H21 又は H22)より

[3]生産性の高さの例(動物プランクトンの例)

表 2.3.2-1 は宍道湖から境水道において動物プランクトンの出現状況を通年観測した結果である(上,2003)。上(2003)は「宍道湖～中海(本庄区含む)の動物プランクトンの平均現存量は、瀬戸内海の平均現存量(20mgC m⁻³)よりも高い傾向にある。特に、カイアシ類だけで現存量の98%を占める宍道湖では80.2mgC m⁻³と高かった。」と述べている。すなわち、カイアシ類が優占して動物プランクトンの現存量が瀬戸内海より多くなっていることが伺える。

以上のようなことから、汽水湖は水生生物の生産性が豊かな場であることが伺える。

表 2.3.2-1 宍道湖～大橋川～中海汽水系 6 定点における環境要因(水柱積算平均水温、水柱積算平均塩分、表層クロロフィル濃度)と中型動物プランクトンの個体密度・現存量

	定 点					
	宍道湖中央部 S-3	大橋川 S-5	中海中央部 N-6	中海南東部 N-4	本庄工区 H-1	境水道入り口 N-8
水温範囲(°C)	2.1～30.8	1.8～30.1	4.9～28.4	6.4～27.5	2.6～30.8	6.6～28.4
塩分範囲	0.7～8.1 (4.0)	0.7～18.1 (9.9)	17.3～24.6 (21.7)	6.4～24.6 (16.4)	9.2～25.1 (18.9)	19.6～27.1 (24.0)
クロロフィル濃度						
範囲(μg l ⁻¹)	3.0～43.6 (18.0)	1.5～61.9 (13.0)	3.0～199 (21.6)	3.0～117 (27.4)	2.0～120 (12.3)	1.5～149 (18.0)
動物プランクトン個体密度						
範囲(×10 ⁴ ind m ⁻³)	0.18～15.4 (4.80)	0.08～19.0 (3.78)	0.02～14.6 (1.58)	0.05～21.8 (3.90)	0.03～16.2 (3.32)	0.02～12.3 (0.90)
動物プランクトン現存量						
範囲(mg C m ⁻³)	3.00～388 (80.2)	0.09～494 (52.3)	0.09～208 (24.5)	0.35～326 (50.1)	0.10～285 (47.4)	0.10～52.1 (8.6)
カイアシ類の占める平均割合(%)						
個体密度	96.3	93.4	85.5	86.6	86.6	79.1
現存量	98.1	94.8	74.7	77.5	80.4	74.9

()の数値は平均値を示す。

瀬戸内海の動物プランクトン平均現存量(20mgC m⁻³)

上真一(2003)「閉鎖性沿岸域の物質循環 [6] 宍道湖 - 大橋川 - 中海汽水系の中型動物プランクトン群集の地理的・季節的変動とそれらの生態的役割」生物研究社,海洋と生物,147,(vol.25 no.4),PP278.

<コラム8>生花苗沼の巨大シジミ

汽水湖の水産業で主な対象種となりやすいシジミは、一般的に約 20~30mm の大きさであってアサリより小粒である。しかし、汽水湖の中には殻長 40mm 以上の巨大シジミが見られる珍しい湖沼（生花苗沼^{おいかまないぬま}）があることから、ここではその事例^{※1}を紹介する。

生花苗沼は北海道大樹町東部に位置しており、海岸沿いに堆積した長さ 3km の砂州によって河口が塞がれた湖面積 1.75km² の汽水湖である。通常、砂州が閉ざされており、その砂州の地下を通じて水の交換が外海と行われている。ただし、荒天によって砂州が決壊するほか、年に 1 回 1 日だけシジミ漁のために砂州を決壊させる。その砂州の決壊に伴い、沼の水量、水位が著しく低下して干上がる場合もある。

生花苗沼のシジミについては、殻長 40mm 以上の巨大シジミが見られることが特徴である。図 C8-1 は、生花苗沼のシジミと他地域（網走湖、手塩川等）のシジミを見比べたものであり、生花苗沼のものは他地域のものより倍以上大きい。

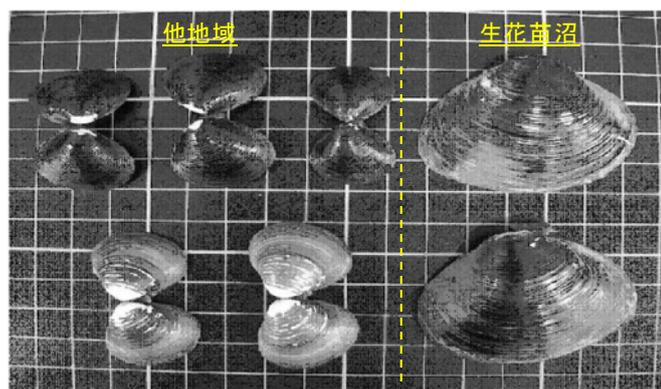


図 C8-1 生花苗沼のシジミと他地域（網走湖、手塩川等）のシジミ^{※1}

生花苗沼のシジミの分布については、湖奥側に 40mm 以上の巨大シジミが多く生息しているのに対し、外海側は 20mm 程度の小さいサイズが生息しているといわれている。塩分環境や水温環境は湖奥側の方が外海側より比較的安定しており、植物プランクトンが増殖しやすい環境が整っていることから、そのような環境の違いが関わっている可能性が示唆されている。

なお、巨大シジミの出現要因の一つとして、個体数密度が低い上に餌が豊富であるなど成長に好条件が重なったため大型化したという説がある。また進化過程でより成長が良い方に適応度が高い条件があったため、成長の良い遺伝子が自然選択された結果、大型化したとされる説もある。

※1: 田中敏明, 五十嵐聖貴, 園田武, 尾島孝男, 福山龍次 (2010) 「生花苗沼の巨大シジミの生態学的考察 (I)」北海道環境科学研究センター所報 36 号, PP35-40.

2.3.3 生物資源による水質浄化能力

湖内における二枚貝等の懸濁物食者や植物帯などについては、人々にとって水産資源や肥料等のエネルギー資源等としての役割を果たすほか、鳥類などの上位捕食者にとっても食物連鎖(図 2.3.3-2)により捕食対象の資源にもなる。さらに人や鳥類などによりそれらを湖外へ持ち出すことに伴って湖内の栄養塩類等の削減といった水質浄化につながることが期待できる(図 2.3.3-1)。

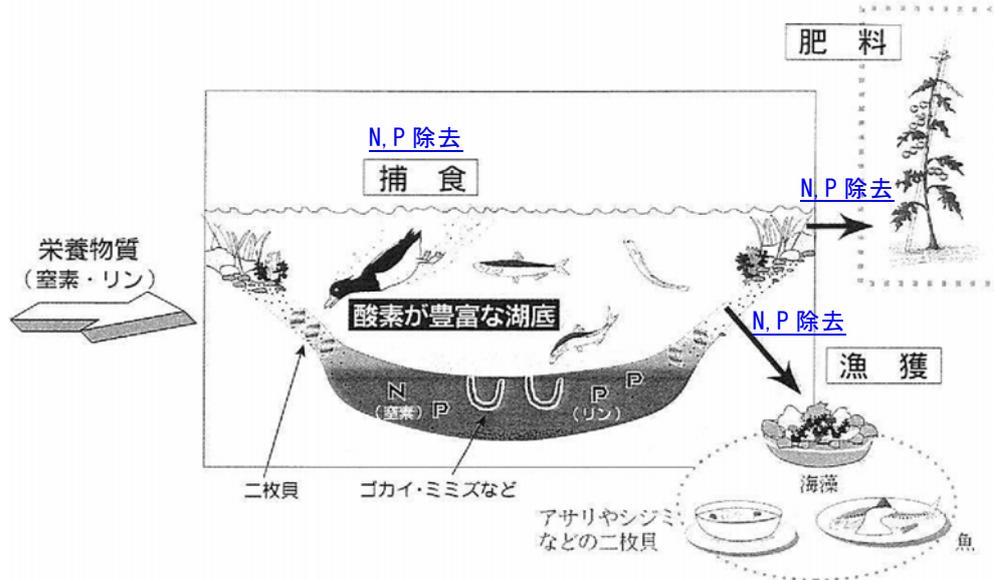


図 2.3.3-1 生物の物質循環に着目した水質浄化機能の概念図

※山室真澄 (2006)「[総説] 浚渫が水環境に及ぼす影響」海洋理工学会誌, 12 (2), PP59-63 (2007年5月発行)に加筆

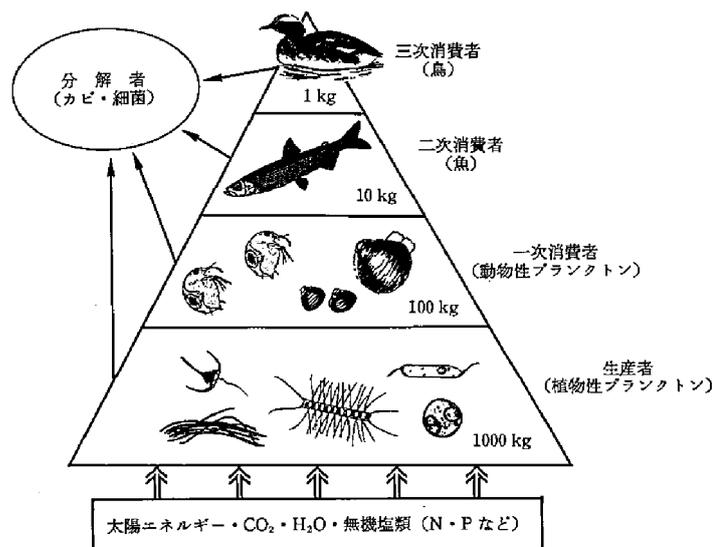


図 2.3.3-2 食物連鎖の概念図

※山室真澄 (1996)「河川感潮域—その自然と変貌(西條八東・奥田節夫 編) 第II部 生態系と物質循環 第6章 感潮域の底生動物」名古屋大学出版会, PP166.

図 2.3.3-3 は 1980 年代後半(シジミ漁獲量が高かった頃)の夏季の宍道湖における窒素収支の模式図である。

宍道湖の底生動物の現存量は、貝殻を除いても 9 割以上がシジミである。シジミは植物プランクトンが光合成に伴って水中から窒素を吸収する速度に匹敵する速度で植物プランクトンを取り込む。シジミの成長量は、河川からの窒素の流入量の 15% に相当する。また取り込まれた窒素分の一部がシジミの漁獲や潜水性カモ類の採餌に伴って系外に持ち出される。

このようにシジミによる窒素等の水質浄化能力が発揮されていると考えられる。

山室(2003)^{※1}は、宍道湖での植物プランクトンによる一次総生産量は年間で 730～1100gC m⁻² であり、富栄養化による藍藻類の異常増殖が問題になっていた頃の霞ヶ浦(770gCm⁻²)や諏訪湖(750gCm⁻²)に匹敵するが、宍道湖の堆積物中の有機炭素濃度は霞ヶ浦や諏訪湖よりも低いと指摘している(表 2.3.3-1)。このことは、宍道湖では窒素・リンの供給により植物プランクトンの生産は高いが、生産された有機物は動物プランクトンやシジミに食べられることを通じて系外に持ち出され、堆積物には蓄積しにくいことを示しており、シジミによる水質浄化機能が発揮しているものと考えられる。

※1: 山室真澄(2003)「閉鎖性沿岸域の生態系と物質循環(3)メイオセントスの量・サイズと塩分との関係」海洋と生物 25(1), PP27-33., 生物研究社

表 2.2.3-1 一次生産量(光合成による有機物生産量)と堆積物表層の有機炭素濃度

湖沼	一次生産量 ^{※2}	堆積物表層の有機炭素濃度
霞ヶ浦	770 (gCm ⁻²)	3.2～6.5 (%) ^{※3}
諏訪湖	750 (gCm ⁻²)	4.4 (%) ^{※4}
宍道湖	730～1,100 (gCm ⁻²)	1.1～4.1 (%) ^{※5}

※2: 山室真澄(1994)「食物連鎖を利用した水質浄化技術」化学工学, 58, PP217-220.

※3: Fukushima T., Aizaki M., and Mutaoka K. (1987), Characteristics of autochthonous deposition and resuspension of sediments in the Takahamairi Bay of Lake Kasumigaura. Japanese Journal of Limnology, 48, S107-S117.

※4: 丸山正人, 赤尾秀雄, 西掘将尋(1982)「長野県下 52 湖沼の底質」用水と廃水 24(12), PP13-19.

※5: Yamamuro M. (2000), Chemical tracers of sediment organic matter origins in two coastal lagoons. Journal of Marine Systems, 26(2), PP127-134.

特に、二枚貝等の懸濁物食者は水中の懸濁態栄養塩類をろ過し、湖内の水質浄化(懸濁物の低減)を図る。懸濁物食者が排出した未消化物(糞など)は、ゴカイ等の表層堆積物食者の餌となる。さらには魚類や鳥類がそれらの豊富な餌資源を捕食することができるようになる。そのような食物連鎖は汽水湖の生産性を高めている要因になっている。

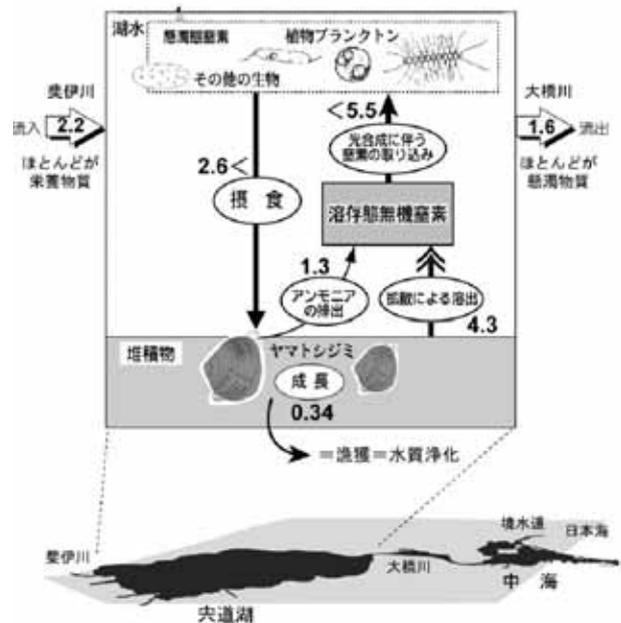


図 2.3.3-3 宍道湖の窒素収支の模式図

※数字は窒素の量(t/day)

※山室真澄(2001)「沿岸域の環境保全と漁業」科学 71-7, PP921-928.

また漁獲や鳥類等による捕食に伴って二枚貝等が湖外へ持ち出されることから、湖内の栄養塩類等の削減といった水質浄化につながることを期待される。

以上のことから、汽水湖において二枚貝等の生物資源による浄化能力は大きいものと考えられる。

＜コラム 9＞潜水性カモ類による栄養塩類等の除去

潜水性カモ類のような水鳥（ホシハジロ、キンクロハジロ、スズガモ）は、二枚貝を採餌していることから、二枚貝に含まれる窒素・リン負荷量が湖外へ搬出されることとなり、汽水湖が有する生態系機能を活用した水質浄化が期待できる。

山室(1997)^{※1}は、中海に滞在するハジロカモ属3種に捕食されるホトトギスガイの軟体部には、有機炭素が290t、窒素が55t、リンが4.2t含まれており、仮にこれに匹敵するホトトギスガイが捕食されずに高水温期まで生き延びると、その分の窒素、リンが分解され湖水に回帰するとともに、その分解時に多くの溶存酸素が消費されると指摘している。一方、ハジロガモ属3種が1日に必要なカロリーを賄うために、ホトトギスガイで1日1羽当たり殻込み湿重量1.3～1.6kg、ヤマトシジミで3.9～4.8kg捕食すると述べている。

このことから、水鳥の確認数に着目することにより、捕食される二枚貝の量や水鳥により湖外へ持ち出される栄養塩類等の量が推測できる可能性がある。

※1：山室真澄(1996)「汽水域での高次生産者を通じた窒素・リンの収支」沿岸海洋研究 35(1), 日本海洋学会, PP69-73.

2.4 汽水湖の利用

2.4.1 水産(漁業や養殖)

多くの汽水湖が漁業や養殖などの水産活動を行う重要な場になっており、そのことは「自治体アンケート」からも伺えた。「自治体アンケート」の回答から整理した汽水湖における漁業や養殖の水産状況を表2.4.1-1に示す。

多くの汽水湖で漁業が実施されており、漁業対象種はシジミやアサリ等の貝類やカニ・エビ類のほか、ワカサギ、コイ、フナ、ウナギ、ハゼ、シラウオや、サケ、マス、カレイ類等の魚類が見られていた。

養殖は、北海道の汽水湖や浜名湖・猪鼻湖、油ヶ淵、三方五湖で行われている。養殖対象種は、北海道の汽水湖ではカキ類やホタテ等の貝を、浜名湖でもカキ類やノリ類、ウナギ等を主に対象としている。また、油ヶ淵や三方五湖ではコイ、フナ等の魚類であった。

なお、漁獲量・養殖量の変遷については「3.2 汽水湖の水産(漁獲量・養殖量)の変遷」で後述する。

表 2.4.1-1 汽水湖における漁業や養殖の水産状況

道県	湖沼	水産の状況			
		漁業		養殖	
		有無	対象種	有無	対象種
北海道	ポロ沼	有	シジミ	無	—
北海道	クツチャロ湖	有	ヤマトシジミ、ワカサギ	無	—
北海道	サロマ湖	有	サケ、マス、カレイ類、チカ、キュウリ、ウニ、エビ、コマイ、ホタテ等	有	ホタテ、カキ
北海道	能取湖	有	ホタテ、カキ、カレイ類、ホッコイ、エビ、チカ、マス等	有	ホタテ、カキ
北海道	網走湖	有	ヤマトシジミ、ワカサギ、シラウオ、コイ、エビ	無	—
北海道	トウフツ湖	有	ワカサギ、スジエビ、ニシン	有	カキ
北海道	風蓮湖	有	テングサ、ホッキガキ、シジミ、エビ、ウニ、ワカサギ、ニシン、カレイ、マス、シラウオ、サケ、ハタハタ等	有	マガキの養殖試験
北海道	厚岸湖	無	—	有	カキ、アサリ
北海道	春採湖	無	—	無	—
北海道	馬主来沼	無	—	無	—
北海道	ホロカヤント沼	有	ワカサギ	無	—
北海道	パンケ沼(天塩)	有	ヤマトシジミ	無	—
青森県	小川原湖	有	ワカサギ、シラウオ、シジミ	無	—
青森県	十三湖	有	ヤマトシジミ	無	—
静岡県	浜名湖	有	アサリ、クルマエビ、ススキ、ウナギ等	有	カキ類、ノリ類
静岡県	猪鼻湖	有	クロダイ、ボラ、ススキ、アサリ	有	カキ
静岡県	佐鳴湖	有	ウナギ	無	—
愛知県	油ヶ淵	有	コイ、フナ、ウナギ、ボラ	有	コイ、フナ、ウナギ
福井県	北潟湖	有	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギ、ハゼ、エビ、シジミ、エムシ	無	—
福井県	久々子湖	有	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギ、ボラ、クロダイ、ハゼ、エビ、シジミ、エムシ	無	—
福井県	日向湖	有	アワビ、ササエ、ウニ、ナマコ、タコ、ワカメ、モズク、イワリ、エビ、ルテングサ、ムシゾウ、エムシ	有	ブリ、フグ、タイ、ヒラメ
福井県	菅湖	有	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギ、ハゼ、エビ、シジミ、エムシ	無	—
福井県	水月湖	有	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギ、ハゼ、エビ、シジミ、エムシ	有	コイ、フナ
福井県	三方湖	有	コイ、フナ、ウナギ、ワカサギ、モロコ、エビ、シジミ、エムシ	有	コイ、フナ、ウナギ
鳥取県	湖山池	有	ワカサギ、シラウオ、エビ類	無	—
鳥取県	東郷池	有	シジミ、フナ、エビ類、ウナギ等	無	—
鳥取県	中海	有	ススキ、ボラ、マハゼ、コノシロ、クロロイ等	無	—
鳥根県	中海	有	ススキ、ボラ、マハゼ、コノシロ、クロロイ等	無	—
鳥根県	六道湖	有	ヤマトシジミ、シラウオ、ススキ、フナ、ウナギ、マハゼ等	無	—
鳥根県	神西湖	有	ヤマトシジミ、ボラ、エビ、フナ、ウナギ、マハゼ	無	—

※上表は「自治体アンケート」より。

2.4.2 観光・親水活動等

「自治体アンケート」の回答から整理した汽水湖における観光・親水活動等の利用状況を表 2.4.2-1 に示す。

遊覧船等の観光や釣り等のレクリエーション活動、飛来白鳥の見学などの利用が行われている汽水湖が多い。また自然環境保全等に関するものとしては、自然公園等の指定区域内に該当する汽水湖が多く、さらにはクッチャロ湖、トウフツ湖、風蓮湖、厚岸湖、パンケ沼(天塩)、三方五湖(久々子湖、日向湖、菅湖、水月湖、三方湖)、中海、穴道湖はラムサール条約の湿地環境として選定されている。

ただし「自治体アンケート」では、人と湖沼の関係の希薄化などの課題が挙げられている。

一方、利水については、汽水湖では塩分の影響により見られていない。唯一農業用水として利用していた湖山池はその利用のために淡水化が進められていた。しかし、現在の湖山池では農業従事者との合意の上、アオコやヒシ対策として塩分を上昇させる対策を講じている。

表 2.4.2-1 汽水湖における観光・親水活動等の利用状況

道県	湖沼	湖沼利用状況		
		利水 有無 内容	観光等 有無 内容	自然環境保全等 有無 内容
北海道	ポロ沼	無	有 釣り(イオ)	有 北オホーツク道立自然公園
北海道	クッチャロ湖	無	有 白鳥飛来見学	有 ラムサール条約 北オホーツク道立自然公園
北海道	サロマ湖	無	有 釣り	有 網走国定公園
北海道	能取湖	無	有 アサリ潮干狩り、釣り、散策	有 網走国定公園
北海道	網走湖	無	有 釣り(ワカサギ)、競技ボート	有 網走国定公園
北海道	トウフツ湖	無	有 白鳥飛来見学	有 ラムサール条約 網走国定公園
北海道	風連湖	無	有 白鳥飛来見学、釣り(ワカサギ、カレイ、ニシ)	有 ラムサール条約 野付風連道立自然公園
北海道	厚岸湖	無	有 釣り	有 ラムサール条約 厚岸道立自然公園
北海道	春採湖	無	有 レンボボート、憩いの場	有 ヒブナ(天然記念物)
北海道	馬主来沼	無	無	無
北海道	ホロカヤント沼	無	有 釣り(ワカサギ)	無
北海道	パンケ沼(天塩)	無	無	有 ラムサール条約 利尻礼文サロベツ国立自然公園
青森県	小川原湖	無	有 水浴、釣り(ワカサギ)	無
青森県	十三湖	無	有 コット、釣り(スズキ、チヌ等)	有 津軽国定公園
静岡県	浜名湖	無	有 水浴、釣り(キス、ヒラメ、ハセ等)、潮干狩り、遊覧船・水上バイク等	有 浜名湖県立自然公園
静岡県	猪鼻湖	無	有 釣り、遊覧船	有 浜名湖県立自然公園
静岡県	佐鳴湖	無	有 釣り(ヘラブナ、コイ、フナ、ウナギ)、ボート	無
愛知県	油ヶ淵	有 慣行水利権 (現在は未使用)	有 公園利用、釣り、モーターボート訓練	有 県営都市公園
福井県	北潟湖	無	有 釣り、カヌー競技	有 越前加賀海岸国定公園
福井県	久々子湖	無	有 釣り、遊覧船	有 ラムサール条約 若狭湾国定公園 名勝三方五湖
福井県	日向湖	無	有 釣り、遊覧船	有 ラムサール条約 若狭湾国定公園 名勝三方五湖
福井県	菅湖	無	有 釣り、遊覧船	有 ラムサール条約 若狭湾国定公園 名勝三方五湖
福井県	水月湖	無	有 釣り、遊覧船	有 ラムサール条約 若狭湾国定公園 名勝三方五湖
福井県	三方湖	無	有 釣り、遊覧船	有 ラムサール条約 若狭湾国定公園 名勝三方五湖
鳥取県	湖山池	有 農業用水	有 釣り(フナ、コイ)、遊覧船	有 世界ジオパーク
鳥取県	東郷池	無	有 釣り、イベント(カヌー大会等)	有 三朝東郷湖県立公園
鳥取県	中海	無	有 釣り(ハセ、スズキ等)、船遊び	有 ラムサール条約
鳥根県	中海	無	有 釣り(ハセ、スズキ等)、ウインドサーフィン	有 ラムサール条約
鳥根県	宍道湖	無	有 釣り(ハセ、スズキ等)、遊覧船	有 ラムサール条約 宍道湖北山県立自然公園
鳥根県	神西湖	無	有 釣り(ウナギ、コイ、ハセ、スズキ等)	無

※上表は「自治体アンケート」より。

※湖山池では、農業従事者との合意の上、平成24年からアオコやヒシ対策として高塩分化を図っており、農業は大規模に水田地域を畑地転換されて行われているため、現在、農業用水の利用が行われていない。

※上表のほか、ゆかし潟(和歌山県)で観光資源として活用などが挙げられたい一方、サルコツ沼やシブノツナイ湖(北海道)のように何も利用されていないという回答も得られている。