

## 養魚環境水の適否の判定に用いた水質分析項目

安富 亮平・今田 和史

魚の成育環境としては、河川、淡水湖沼、汽水湖、沿岸域と、水の存在する場所が広く利用されています。しかし、すべての水が魚の生育に適しているとはいえず、利用しようとする水が魚の生育に適しているか否かを検討しなければなりません。このような際の参考資料として、水生生物保護に必要な水質基準を整理した(社)日本水産資源保護協会の「水産用水基準」(表1)が主に利用されます。

多種多様な水がある中で、養魚用水としての適否を、すべて水産用水基準で解決することには限界があります。このような水に対して、利用可能か否かの最終的な判断は、過去から集積してきた魚の飼育環境の水質データを勘案して判断しています。したがって、水質分析データの収集とその保存は、非常に重要なことと言えます。水質分析は、JISなどで決められた公定法により分析することが基本です。一方、簡易水質測定キットの利用は、現場でおおよその測定が必要となった時、また、精密分析時のおおよその濃度を推定するなどには有効です。しかし、あくまでも簡易測定方法であることを念頭におき、数値を比較する場合には、決められた分析方法で行った結果と、どの程度異なるかの検討が必要です。集められる水質データは、比較に耐えられるような分析精度を持った数値であることが必要です。

当場では、古くから魚の飼育や魚類の生息環境に関する水質調査を実施してきました。この間、測定項目は必要に応じて選定しています。また、測定機器の発達による測定項目の追加も行なってきました。では、測定項目がどのような考えに基づいて選択されてきたのか、また、測定項目の持つ意味や役割などについてまとめました。

本稿は、過去の調査報告書や研究報告などに記載した内容を一部加筆、修正し整理したものです。いろいろな場面で水産養殖や水産増殖に携わり、養魚環境に関心を持っておられる方々が、水質分析結果を見たり、考えたりするための参考になればと思います。さらに、当場で行ってきた、分析結果の解析方法についても、簡単に整理しましたので、何かの参考にしていただければ幸いです。

### 1、測定項目のもつ意味

「水」は魚介類の生息にとって欠かすことができない環境条件です。しかし、日常の漁業活動のなかでは、水の性状はどうか、水中の生き物へ水がどんな役目を

果たしているか、などと意識する機会は少ないでしょう。

水には水産生物にとって、極めて重要な面があります。その一つは、植物プランクトンの生産を維持する栄養塩の運び手であることです。水中で、二酸化炭素と光などの無機物から有機物を作り出すという生物界で根幹の働きを植物プランクトンがおこなっています。さらに、植物プランクトンは動物プランクトンをはじめとする水生生物の生存の基本となる餌量になります。

もう一方では、融雪や降雨により多量の水とともに入水し、著しい濁りをもたらすことがあります。これは、水域環境の美観を損なうと同時に、多量の濁りが水中への光の透過量を減少させ、植物プランクトンの生産を阻害するという面も無視できません。また、流入した泥による底質悪化も起きかねません。

種々の魚種を対象にした漁業生産の場である河川や汽水湖あるいは沿岸域が、どのような環境におかれているかについては、変動を代表する項目を定期的に観測する必要があります。また、状況に応じて調査項目を追加するなど、モニタリングによる資料の蓄積を行い、そのデータの解析を行うことが重要です。

本稿では魚の生育環境としての「水」を考えるとき、栄養塩の添加という、生物の生産をプラスにする働きを持つ場合と、逆にマイナスに働く場合について考えます。それに、カルシウムやナトリウムなどのプラスのイオンやマイナスのイオンであるミネラル分のデータ解析から、どんなことについて考えられるかなどを取り上げました。

#### 1) 水産生物の生育に必要な基本項目

水産生物が健全に生きられる環境を維持し、適正な物質循環が行われる環境の指標となるものです。

水温、水素イオン濃度(pH)、溶存酸素(DO)、電気伝導率(EC)、硝酸態窒素( $\text{NO}_3^-$ -N)ケイ酸( $\text{SiO}_2$ )、リン酸イオン( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、クロロフィルa、透明度(透視度)

#### 2) 高濃度では水生生物の生育障害となる項目

環境を形成する項目ですが、濃度が増すと生息に悪影響をもたらします。

化学的酸素要求量(COD)、生物学的酸素要求量(BOD)、浮遊物質(SS)アンモニア態窒素( $\text{NH}_4^+$ -N)、亜硝酸態窒素( $\text{NO}_2^-$ -N)、硝酸態窒素( $\text{NO}_3^-$ -N)、総鉄量(Fe)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)、全有機炭素(TOC)、溶存有機炭素(DOC)

### 3) 地点間の類似性や水質の由来を検討する項目

濃度分布から測定場所のグループ化や水質濃度の類似性などの評価から、水質の由来などを検討します。硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )、塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )、カルシウムイオン( $\text{Ca}^{2+}$ )、マグネシウムイオン( $\text{Mg}^{2+}$ )、ナトリウムイオン( $\text{Na}^+$ )、カリウムイオン( $\text{K}^+$ )、ケイ酸( $\text{SiO}_2$ )、紫外外部吸光度、アルカリ度

## 2、各項目の概略

### 1) 水産生物生育に必要な基本項目

#### 水温

水質の基本的データです。溶存酸素の飽和量を知るためにも測定は欠かせません。外気温より高い水温の河川では、排水や温泉水の混入なども考えられます。また、冬期間表面が結氷しない小河川などは、湧水の流入も考えられます。サケ・マス類の冷水性の魚類では 5~15°C 程度が河川での生息範囲とされています。

#### 水素イオン濃度 (pH)

水の酸性・アルカリ性の尺度となるものです。イオンや有機物を含まない純水の pH は 7 です。清浄な淡水域では pH は 7 前後で、海域では 8.4 前後です。

夏季に水草の多いところでは、光合成によって水中の炭酸物質が減少するため、河川水でも pH は上昇します。とくに、夏季の清流でアルカリ側に高い pH が観測される場合、水草による光合成の影響が考えられます。このとき同時に溶存酸素も高くなり、飽和度で 100% を大きく超えます。

RpH (Reserve pH, Reserved pH) は、水にきれいな大気を十分に通気した後の pH です。水中に二酸化炭素が多く、酸性側に少し傾いた水の場合、 $\text{RpH} > \text{pH}$  になります。このように RpH の測定は、二酸化炭素に左右されない pH で、水本来の pH として重要視されています。

1970 年前後に、洞爺湖の pH が 5 まで低下し、ヒメマスもほとんど取れなくなったことがありました。この原因は酸性の鉱山排水を流入させたことによりですが、その後排水は石灰で中和して流すようになり、現在の湖水の pH は中性に回復しました。そのほか、原因は定かになっていませんが、酸性湖沼であった屈斜路湖でも、pH は中性に回復しています。

◎水産用水基準：淡水域は pH6.7~7.5、海域は pH7.8~8.4。

#### 溶存酸素 (DO)

水中に溶解する酸素量は魚の生存と生育量を決定する最重要項目です。溶存酸素は水温によって溶け込める量

が異なり、淡水では 5°C では 12.4mg/L が飽和量 100% の値です。水温の上昇とともに飽和量は減少し、サケ・マスの孵化水温である 8°C では 11.5mg/L となり、15°C では 9.8mg/L となります。サケ・マス類を池で飼育する場合、魚が正常に生育出来る酸素飽和量は 70% 前後で、これより以下になることは好ましくありません。魚は水温が上昇すると代謝も高まり酸素消費量も増しますが、逆に水中に溶け込める酸素量は減少します。水温が上がるにつれ魚の摂取可能な酸素の絶対量は少なくなるため、一定の水で飼える量も減少します。

水中に水草が繁茂する河川では、昼間は水草の炭酸同化作用によって酸素が加えられるため飽和度は 100% を超えることがあります。また、夜間から早朝にかけては、呼吸作用により植物は酸素を消費しますので、水中の酸素量は減少します。また、汚れた飼育水では、有機物の分解も重なり、酸素低下による魚の斃死がおきることもあり、池などでは、流入する水量や魚の飼育量に注意が必要です。

このほか、水質汚濁の進行や、底質の悪化により、有機物が酸素を消費するため、沼や湖では貧酸素水塊が発生しやすくなります。

◎水産用水基準では、淡水域と海域に最低濃度として、維持されるべき濃度が示されています。

河川・湖沼では 6 mg/L 以上。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は 7 mg/L 以上。海域は 6 mg/L 以上。内湾漁場の夏季底層において最低限維持しなくてはならない溶存酸素は 4.3 mg/L。

#### 電気伝導率 (EC)

水中の溶存イオン濃度が増すと電気が通りやすくなることから、電気伝導率は溶存イオン量に比例するとされ、水中の溶解物質のおおよその値を推定する指標となります。水塊はその起源によって溶解物質の組成が異なり、電気伝導率に差がみられます。電気伝導率は、現場で直ちに値をみることで出来るため、異なる水の混合度を推定することも出来ます。

海水中では淡水域に比較して電気伝導率が高く、塩分測定に電気伝導率が用いられ psu の単位で示されます。EC は、25°C に補正した値を用います。平成 22 年の夏に北海道の保護水面河川で測定された EC は 4~24 (mS/m) でした。魚の生育する淡水域では、電気伝導率はこのような値の範囲にありました。

水産用水基準は設定されていません。

#### 硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3^-$ -N)

硝酸態窒素はアンモニアの最終酸化物です。最近、硝

酸態窒素による地下水汚染が問題視されています。この起源は、大部分が肥料の硝酸化合物に由来すると考えられています。北海道では、地域によって冬季間の河川水中の濃度が高い例が確認されています。アンモニアの酸化（硝化）と、同時に微生物の働きで、脱窒と呼ばれる硝酸態窒素の還元が行われ、窒素ガスが放出されます。このため、地下水中の硝酸態窒素濃度も低下します。しかし、冬季間は微生物の働きが低下して、脱窒量も低下し、硝酸態窒素が蓄積されるため、高濃度の硝酸態窒素が流出すると考えられています。

また、海域の硝酸態窒素濃度は少なく、植物プランクトンの生産の制限要因にもなっています。このため、沿岸域では河川水による硝酸態窒素の供給は、植物プランクトンの増殖を高めるといった大きな役目も考えられます。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖（2009年8月）では、0.071~0.091mg/L、洞爺湖（2007年3月）では、0.225~0.232mg/L、支笏湖（2009年10月）では、0.047~0.060mg/Lがあります。

◎水産用水基準：淡水域の硝酸態窒素は9mg/L以下、海域では7mg/L以下。硝酸態窒素は、水産生物に対する毒性は強くはありません。

### ケイ酸(SiO<sub>2</sub>)

ケイ酸(二酸化ケイ素)は、ほとんどが花崗岩等の風化によって供給されています。ケイ酸は、海域や湖水のケイ藻の外殻形成に用いられるため、重要な成分となっています。火山の多い北海道では、孵化用水の湧出のもととなっている地層が火山灰土の例が多く、サケ・マスの孵化用水には比較的高い濃度でケイ酸が含まれています。河川での濃度は海水より高く、生物生産の制限要因となることはありません。また、海水中のケイ酸濃度の変化を比較すると、河川水の影響が沿岸域のどのくらいの範囲に及ぶかを知る際にも利用できます。

過去の測定結果の例としては、洞爺湖（2007年3月）では、18.6~18.8mg/L、支笏湖（2009年10月）では、21.8~22.2mg/L、西別川上流（2004年4月）では、45.8~48.0mg/Lがあります。また、暑寒別川（2001年）の調査では、融雪増水時に低くなった他は、10~15mg/L程度と比較的安定した濃度でした。

河川の場合は、融雪増水時など雨水の影響が出てくる場合に低い濃度を示します。

水産用水基準は設定されていません。

### リン酸イオン(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)

リンも窒素と同じく生物の主要な構成元素で、湖沼ではその量が少なければプランクトンの増殖の制限因子と

なります。水中のリンの由来は、排水のほかには地質的な条件も考えられます。火山土を形成する火成岩の中にはSiO<sub>2</sub>が45~75%程度含まれ、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>が0.1~0.2%含まれることから、火山性土壌から湧出する地下水には、やや多く含まれる可能性があります。リンは鉄に付着して沈降することから、湖沼や停滞する水域では底層水の酸素が減少して貧酸素になると、リン酸イオンとして再溶出していきます。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖（2009年8月）では、0.005~0.013mg/L、洞爺湖（2007年3月）では、<0.003mg/L、支笏湖（2009年10月）では、0.005~0.007mg/Lがあります。

◎水産用水基準：海域ではノリ養殖に必要な栄養塩濃度として窒素とともに濃度範囲（無機態リン PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 0.007~0.0014 mg/L）が決められています。

### クロロフィルa、フェオフィチン濃度

水域のCO<sub>2</sub>（無機物）と太陽光から有機物を生産する光合成を行う色素です。植物プランクトンはクロロフィルaを持っていることから、クロロフィルaとして測定される値は植物プランクトン量の指標となります。クロロフィルの分解過程でMgがはずれ、フェオフィチンになります。このクロロフィルaとフェオフィチンの割合で植物プランクトンの活性状況が推定できます。河川水による栄養塩類の供給は沿岸域のクロロフィルa濃度を押し上げる役目も持ちます。さらに、サイズ分けをして測定することにより、基礎生産を行っている植物プランクトンのサイズ構成を明らかにしています。クロロフィル濃度は、湖沼の生物生産の重要な指標の一つでもあります。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖（2009年8月）では、0.3~0.9μg/L、洞爺湖（2007年3月）では、1.1~1.3μg/L、支笏湖（2009年10月）では、0.3~0.7μg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

### 透明度と透視度

水が澄んでいるか濁っているかを表す指標となります。湖沼や海域では30cmの白色円盤（セッキ板）を水中に降ろし、肉眼で見えなくなる深さが透明度です。濁りの少ない湖沼や汽水域では透明度とクロロフィルaの基礎生産とは高い相関関係があります。したがって、クロロフィルa濃度が少なく透明度が低い場合などは、濁りによる影響を考えなければなりません。河川では透視度が用いられ、透視度計の底面に設置された標識板の二重の十字が初めて明らかに識別できるときの水中の高さ(cm)

を度で表します。また、水深が浅い湖沼や、濁りが著しい湖沼では透明度に代えて透視度が使われます。過去の支笏湖の透明度測定例では、1975年5月に35m、1979年5月に38.5mを観測しました。ここまでの透明度になると、セッキ板は白い点のように小さくなり、読み取りには全神経が集中します。

◎水産用水基準：懸濁物質の項目に透明度の記述があります。貧栄養湖で、サケ・マス・アユなどの生産に適する湖沼においては、自然繁殖および生育に支障のない条件として、透明度は4.5m以上、懸濁物質は1.4mg/L以下であること。温水性魚類の生産に適する湖沼においては、自然繁殖および生育に支障がない条件として、透明度は1.0m以上、懸濁物質は3.0mg/L以下であること。

## (2) 高濃度では水生生物の生育障害となる項目

### 化学的酸素要求量(COD)

水中の有機物を過マンガン酸カリウムなどの化学薬品で酸化したときに、消費される酸素の量を表したものです。環境基準では湖沼と海域の有機物量の指標として用いられ、河川水には適用されていません。北海道には泥炭地質の地域も多く、難分解物質として存在するフミン酸、タンニン酸、フルボ酸などがCODとして測定されます。このため、工場排水の流入がない河川でも、泥炭地層を流下する河川ではCODが高く測定されます。環境基準にCODが適用されない河川でも、BODや紫外吸光度(後述)と併せて検討することで、泥炭地質の影響の有無が評価できます。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖(2009年8月)では、 $<0.5\sim 0.9\text{mg/L}$ 、洞爺湖(2007年3月)では、 $<0.5\sim 0.7\text{mg/L}$ 、支笏湖(2009年10月)では、 $0.7\sim 0.9\text{mg/L}$ があります。

◎水産用水基準：湖沼の自然繁殖の条件として $\text{COD}_{\text{Mn}}$ (酸性法)は4mg/L以下であること。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は2mg/L以下であること。生育の条件として、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ が5mg/L以下であること。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は3mg/L以下であること。海域では、一般の海域では、 $\text{COD}_{\text{OH}}$ (アルカリ性法)は1mg/L以下であること。ノリ養殖場や閉鎖性内湾の沿岸域では $\text{COD}_{\text{OH}}$ は2mg/L以下であること。

### 生物化学的酸素要求量(BOD)

5日間20℃の一定温度で培養し、水中の有機物を生物化学的に酸化したときに消費される酸素の量を表したものです。河川における有機物量の指標として用いられ、上述の難分解物質はBODとして表れにくく、難分解物質の影響でCODが高くてBODが低く測定される河川があ

ります。

◎水産用水基準：河川で自然繁殖の条件として、BODは3mg/L以下であること。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は2mg/L以下であること。生育の条件としては、BODは5mg/L以下であること。ただし、サケ・マス・アユを対象とする場合は3mg/L以下であること。

### 浮遊物質(SS)

懸濁物質ともいい、水中に浮遊する濁りなどの物質質量です。水中の濁りは有機物によるものや鉱物などの無機物によるものが存在します。SSは、孔径 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ のフィルターを通過せずフィルター上に残存する成分と定義されます。一般にはワットマンGF/Cガラス繊維ろ紙で水をろ過し、乾燥後の残存物の量を測っています。また、濁度は水中の光の透過率から水の濁りを測ったものと呼ばれ、SSと同様に水の濁りの指標となります。機器による濁度は連続測定に向きますが、河川ごとにSSと濁度の相関を求めておく必要があります。なお、濁りはCODにも影響し両者の相関も高ことが知られています。一例として、網走川の網走湖に流入する近くで、台風通過後(2009年10月)に650mg/Lが測定されています。

◎水産用水基準：淡水域と海域で異なり、常態の濃度と、人為的に加えられる量の基準が分かれています。河川では、25mg/L以下であること。ただし人為的に加えられる懸濁物質は5mg/L以下であること。忌避行動などの反応を起こさせる原因とならないこと。日光の透過を妨げ、水生植物の繁殖、成長に影響を及ぼさないこと。湖沼では、貧栄養湖で、サケ・マス・アユなどの生産に適する湖沼においては、自然繁殖および生育に支障のない条件として、透明度は4.5m以上、懸濁物質は1.4mg/L以下であること。温水性魚類の生産に適する湖沼においては、自然繁殖および生育に支障がない条件として、透明度は1.0m以上、懸濁物質は3.0mg/L以下であること。海域では、人為的に加えられる懸濁物質は2mg/L以下であること。海藻類の繁殖に適した水深において必要な照度が保持され、その繁殖と成長に影響を及ぼさないこと。

### アンモニア態窒素( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ )

窒素は生物の主要な構成元素であり、湖沼や海域では量が少なければプランクトンの増殖の制限因子となります。植物プランクトンが直接摂取できる溶存無機態の窒素としては硝酸塩・亜硝酸塩・アンモニアがあげられます。河川では周辺地質や種々の排水などから供給される例が多く、むしろ河川環境の汚染物質として考えていいでしょう。全アンモニアとして測定される中には非解離のアンモニア( $\text{NH}_3$ )があって、これが水生生物に対しては強い

毒性を示すといわれています。非解離のアンモニアは pH がアルカリ側に傾くにつれてその量が増えます。アンモニア分析で使用される、インドフェノール法の分析では  $\text{NH}_3$ 、 $\text{NH}_4^+$  の両者が区別できないこと、さらに最近では、解離のアンモニア ( $\text{NH}_4^+$ ) の毒性も考えられるようになったことから、水産用水基準では非解離、解離をあわせたアンモニア態窒素として表記されています。

◎水産用水基準：淡水域 0.01 mg/L 以下、海域 0.03 mg/L 以下。

### 亜硝酸態窒素 ( $\text{NO}_2^-$ -N)

アンモニアが酸化されて出来る中間産物です。硝酸イオンが還元された場合にも出てきます。通常の河川水で検出される量は極めて少なく、有機物排水が流入する河川ではやや高い濃度で検出されます。亜硝酸態窒素は水生生物の呼吸に強い悪影響を持ち、血液中のヘモグロビンの酸素結合力を失わせるメトヘモグロビン症の原因物質です。低酸素条件下ではこの毒性も強まるといわれています。

◎水産用水基準：淡水域で 0.03mg/L、海域で 0.06mg/L。

### 硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3^-$ -N)

(1) のとおり

### 酸可溶性鉄量(総鉄量 Fe)

水中の鉄の存在状態は複雑であり、存在状態ごとに正確に分析することは難しいとされています。安定した存在状態は  $\text{Fe}^{3+}$  (3価) ですが、不安定である  $\text{Fe}^{2+}$  (2価) も混在します。泥炭地の腐植物は鉄を吸着していることがあり、地中の酸素のないところでこのような地下水が嫌気分解を受け、 $\text{Fe}^{2+}$  が離れ湧出します。また、これが地上に出て酸素に触れると茶褐色の水酸化鉄の沈殿(鉄サビ)を生じます。 $\text{Fe}^{2+}$  の電子は鉄細菌のエネルギー源として利用され、鉄細菌は細胞周辺に水酸化鉄を沈着させることから、 $\text{Fe}^{2+}$  が流出しているところでは鉄サビの付着することにも注意する必要があります。酸性の鉱山排水にも  $\text{Fe}^{2+}$  が含まれ、この水が流下するに従い中性化すると水酸化鉄の沈殿が生じます。赤川と呼ばれる河川はこのような成り立ちをしています。鉄は河川の濁りの中にも含まれており、濁りを塩酸で溶解させて(酸可溶性鉄)測定すると、浮遊物質(SS)と総鉄量は強い正の相関が見られます。また、必要に応じて  $\text{Fe}^{2+}$  についての分析も必要です。

◎水産用水基準：淡水域 0.09 mg/L、海域 0.2mg/L。

### 全窒素(T-N)

水中に含まれている窒素化合物は、前述のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の三つの性質の無機態窒素と、窒素の化合物や微生物等の有機態窒素に分けられます。植物プランクトンの体成分は粒子態有機窒素ですが、最近では組成が分かるように、溶存態と粒子態(懸濁態)に分けて測定される例も多くなっています。全窒素はさまざまな形態の窒素の濃度を合計しており、水質汚濁の指標に用いられています。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖(2009年8月)では、0.146~0.199mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、0.256~0.311mg/L、支笏湖(2009年10月)では、0.097~0.125mg/Lが測定されています。

◎水産用水基準：河川での基準値はない。湖沼では、コイ・フナを対象とする場合 1.0 mg/L 以下、ワカサギを対象とする場合 0.6 mg/L 以下、サケ科・アユ科を対象とする場合 0.2 mg/L 以下。

海域では環境基準が定める水産1種 0.3 mg/L 以下、水産2種では 0.6 mg/L 以下、水産3種では 1.0 mg/L 以下。ノリ養殖に最低限必要な栄養塩濃度として無機態窒素 ( $\text{DIN}=\text{NH}_4^+-\text{N}+\text{NO}_2^-+\text{NO}_3^-$ ) は 0.07~0.1 mg/L。

### 全リン(T-P)

全窒素の項で説明したように、水中に含まれるリン化合物にも、リン酸イオンのような無機態のリンと、生物体や排水に含まれる有機態リンとがあります。植物プランクトンが直接摂取できるのは溶存無機態リンで、そのほとんどがリン酸態リン(リン酸イオン)です。さまざまな形態のリンの濃度を合計したものを全リンと呼び、水域の栄養度と水質汚濁の指標に用いられます。リンも溶存態や粒子態に分けて測定されるようになり、得られる情報量が増してくるようになりました。

◎水産用水基準が設定されていますが、河川での基準値は設定されていません。湖沼では、コイ・フナを対象とする場合 1.0 mg/L 以下、ワカサギを対象とする場合 0.05 mg/L 以下、サケ科・アユ科を対象とする場合 0.01 mg/L 以下。

海域では、環境基準が定める水産1種 0.03 mg/L 以下、水産2種 0.05 mg/L 以下、水産3種 0.09 mg/L 以下。ノリ養殖に最低限必要な栄養塩濃度として、無機態リン 0.007~0.014 mg/L。

### 全有機炭素(TOC)、溶存有機炭素(DOC)、全炭素(TC)、無機炭素(IC)

試水中の酸化される有機物の全量を炭素(C)の量で示したものが TOC です。TOC は COD に変わる指標として用

いられる機会が増えてきています。DOCはろ過した後の水に含まれる被酸化炭素の総量を表します。両者の比較から、懸濁態の有機物が多いかあるいは溶存態の有機物が多いかを判断できます。TCは水中の全炭素です。これは、植物、生物体に含まれる有機炭素と次の無機炭素ICを含んでいます。ICは、二酸化炭素、炭酸イオン、重炭酸イオンなど植物の光合成に必要なものです。TCとICの差が、総有機炭素(TOC)です。

過去の測定結果の例としては、倶多良湖(2009年8月)では、COD 0.3~0.9mg/Lのとき、TOC 0.6~1.1mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、COD <0.5~0.7mg/LのときTOC 0.5~0.9mg/L、支笏湖(2009年10月)では、COD 0.8~0.9mg/LのときTOC 0.3~0.5mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

### (3)水の由来や水質の良否を検討する項目

#### 硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

硫酸イオン自体は酸性でもアルカリ性でもありません。酸性となる硫酸は硫酸イオンと水素イオンが同時に多量に含む場合です。硫酸イオンは海水中に多量に含まれており、海水の飛沫が風で陸域に運ばれ(風送塩)、融雪水や雨水に溶解して流れ出てきます。燃焼物に由来するのは、排煙中に含まれる硫酸化合物が雨水中に溶出し酸性雨の原因となっています。また、硫化物鉱床からの溶出や温泉水や海水の流入による硫酸塩の増加も起こります。さらに、産業排水や家庭廃水に含まれる硫酸塩もあります。化学肥料起源の硫酸塩もあります。

過去の測定結果の例としては、倶多良湖(2009年8月)では、5.8~6.7mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、34~40mg/L、支笏湖(2009年10月)では、34~36mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

#### 塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)

水温と同様に水塊の分布や水の素性を知り得る項目となります。家庭の雑排水、排泄物中には多量の塩化物イオンが含まれることから、水域の人為的な汚染を調べるときに必要な項目となります。また、河口域や沿岸海域においては、外洋水と河川水の混合の度合いを知る指標となります。海水では電気伝導度から算出した塩分を定義する方法が一般的で、psuの単位で計られます。従来法によるパーミル(‰)とほぼ同じ量です。淡水域では濃度が低いため、mg/Lの濃度で測定します。また、人間が塩味を感じる濃度は200~300mg/Lといわれていて、淡水と汽水を分けるのもこの範囲での塩化物イオンが境界になっています。塩化物イオンは岩石の風化による溶出は

少ないとされており、雨や風送塩あるいは温泉水の流入などが濃度増加の原因となります。

過去の測定結果の例としては、倶多良湖(2009年8月)では、3.7~4.2mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、12mg/L、支笏湖(2009年10月)では、15~16mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

#### カルシウムイオン(Ca<sup>2+</sup>)

流水中の溶解性無機物で最も量が多いのはカルシウムCa<sup>2+</sup>であり、淡水中の最も重要な主成分です。国内の河川水の含有量は比較的少ないです。カルシウムの由来はほとんどが炭酸塩を含む岩石の風化作用であり、石灰岩を含む地層や鍾乳洞からの水には多く含まれます。一般に、孵化用水に多く使われている火成岩地帯からの湧水ではカルシウム濃度は少ない傾向にあります。

過去の測定結果の例としては、倶多良湖(2009年8月)では、3.0~3.6mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、13~14mg/L、支笏湖(2009年10月)では、13~14mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

#### マグネシウムイオン(Mg<sup>2+</sup>)

マグネシウムの起源は、岩石土壌の風化によるものが最も多いといわれています。海水中には多量に含まれるので、マグネシウムの起源として風送塩に由来する量も多くなります。また、マグネシウム濃度から淡水と海水の混合も検討できます。カルシウムとマグネシウムの当量の合計を硬度と定義しています。硬度が高くなるほど有害金属の毒性は緩和されるといわれています。海水では、塩化物イオン、ナトリウムイオン、硫酸イオンにつぐ4番目に高い濃度を示します。また、淡水域ではカルシウムや硫酸イオンに比べると濃度が低い傾向にあります。

過去の測定結果の例としては、倶多良湖(2009年8月)では、1.5~1.8mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、2.0~2.1mg/L、支笏湖(2009年10月)では、3.5~3.7mg/Lが測定あります。

水産用水基準は設定されていません。

#### ナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>)

ナトリウムは一般に塩化ナトリウムを含んだ岩石の風化作用で生じ、塩素とともに検出されます。海水には多く含まれますが、温泉水にも濃度の高いものもあることから、海水や温泉水の混入の指標ともなります。海岸付近では風送塩による影響もあります。世界的には、道路の凍結防止剤などによる人為的要因も3割弱含まれると

いわれています。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖(2009年8月)では、4.8~5.5mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、11~12mg/L、支笏湖(2009年10月)では、16~17mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

### カリウムイオン(K<sup>+</sup>)

カリウムは溶存態無機物成分の中では通常最も量の少ない項目です。その由来は花崗岩等の風化、特に長石や雲母によるものが9割を占めるとされています。カリウムの詳細な行動はまだ十分検討されていませんが、夏には植物の生長によって土中のカリウムが吸収されるため、流水中のカリウム濃度の低下するケースが多いといわれています。酪農地域での調査では、カリウムは畜産排水に多く含まれることが分かり、カリウム濃度の高低で排水流入の影響を検討できます。

過去の測定結果の例としては、倶多楽湖(2009年8月)では、0.4~0.5mg/L、洞爺湖(2007年3月)では、1.1~1.3mg/L、支笏湖(2009年10月)では、1.8~1.9mg/Lがあります。

水産用水基準は設定されていません。

### 紫外外部吸光度(E240)

水中の有機物は紫外線を吸収します。水の紫外外部吸光度の強弱と、従来から行われているCOD濃度の高低とは、強い正の相関を持つ例が多くあります。このことから、紫外外部吸光度を有機物汚染の概要をあらわす指標として用いることは、40年以上前から提唱されています。一方、泥炭地帯を流れる河川水には、腐植質であるタンニン酸、フミン酸、フルボ酸など難分解物質といわれる物質が多く含まれ、これらの物質も紫外線を吸収します。CODの項でもふれましたが、これらの難分解物質はCOD濃度にも関与してきます。有機物以外にも硝酸態窒素が220 $\mu$ m以下に吸収を持ちますが250 $\mu$ m付近の吸光度にはほとんど影響しません。この性質からCODとして測定される有機物と紫外外部吸光度から推測される有機物の関係について検討を加えることで、河川水が泥炭地帯を經由しているか否かを推定しています。表示は、0.8 $\mu$ mのフィルターでろ過したろ液の240 $\mu$ mの吸光度を1000倍したE240を著者らは使用しています。過去の測定結果の例として、倶多楽湖(2007年6月)では、COD 0.9mg/Lで、TOC 0.8mg/LのときにE240は4を示しました。また、網走川支流(2010年1月)の数値として、COD 6.8mg/L、TOC 3.5mg/LのときE240が131を示しました。このようにE240が高い値の場合は、他の水質分析項目、河川周辺

の土地利用状況などから、人為的なものか、腐植物質などの自然界の難分解性物質によるものかを検討することで、水質の由来を推定しています。

水産用水基準は設定されていません。

### アルカリ度

水の緩衝能力を示す指標です。アルカリ度は、試水に希硫酸溶液を滴下し、pH4.8となるまでに要した硫酸の量から計算します。アルカリ度が高ければ炭酸物質が多いと考えて差し支えありません。また、炭酸物質が少ない水のアルカリ度は低く、硝酸などの酸性物質の流入で酸性化しやすいと考えられます。また、雨水や融雪水にはアルカリ度がほとんどなく、水中のアルカリ度は水が土や岩石と反応した結果供給される成分です。アルカリ度が高い水は、緩衝作用を示し、多少の水質の変化にも安定したpHを示します。アルカリ度の低い水は、溶存イオン量が少ないことのほか、酸性物質の流入なども考えられます。過去に酸性化した洞爺湖(1968年8月)ではpH5.1のときに0.01meq/Lが測定されました。倶多楽湖(2009年8月)では、0.3meq/L、ですが、洞爺湖もpHが回復し、2007年3月では、倶多楽湖と同様、0.3meq/Lが測定されています。支笏湖(2009年10月)では、0.8meq/Lです。

水産用水基準は設定されていません。

## 3、結果の理解に使われる方法

水質分析項目の取り方によっては、データ数が非常に多くなり、データの相互比較が難しくなります。最近ではパソコンを使うことにより、統計的な解析も簡単にできるようになっています。

一般に分析結果の濃度から平均値を求めるなど、正規分布を前提にした統計処理をされる例が多いのですが、収集した値の分布が正規分布か、そうでないかについての検討は欠かせません。このためには、データの集積は不可欠です。過去に今田らが阿寒湖、支笏湖、渡島大沼で、透明度、COD、Cl、SiO<sub>2</sub>、Hardness(硬度)、Ca、Mg、SO<sub>4</sub>について、正規性の検討をしています。それによると湖による違い、分析項目によっては正規分布ではないものもあることを報告しています。

以下には、さけます・内水面水産試験場の報告書で使われることが多い、濃度相関マトリックスとトリリニアダイアグラム、分析異常値が出た場合の再考のために利用できる水質相互間の関係について、簡単に説明します。

### 濃度相関マトリックス(図1)

これは古くからある、水質多成分比較法の一つです。

地点間の水質の関連性を見るのに使っています。

マトリックスの数字(相関数)が1に近いほどサンプル間の相関性が高いこととなります。また、単に成分間の相関係数のマトリックスではないことに注意が必要です。詳細は参考書(水汚染の機構と解析、日本地球化学会編1973)を見ていただくとして、サンプルの成分間の濃度比から相関数を計算し、相関数の分布率が10%以上になる相関数のサンプル間は類似性が高いと判定します。

### トリリニアダイアグラム(図2)

通常、水中のイオン類はpHが中性付近では、+イオンと-イオンで、当量あります。また、これらの濃度は水の特徴を現しています。これらイオンの割合を調べることによって水質的な分類が可能です。一般に、硫酸イオン、塩化物イオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、ナトリウムイオン、カリウムイオンと炭酸イオン(pHが中性付近では、アルカリ度からも計算できます。)を使用して、イオンバランスを見ます。これらの当量数の割合(一辺が0~100%のグラフ)を図示したものです。

### 水質相互間の関係(図3)

分析結果の異常値については、水質項目間の関連から推定できます。これは、異常値が出た場合の検討すべき水質項目を矢印で結んだものです。たとえば、有機物が多いのにCODが低い、浮遊物質が多いのに鉄が少ない。このような結果が出た場合は、データの再考が必要になります。また、イオン類についても+イオン、-イオンで当量の関係が成り立っているかを調べることで、分析精度を調べられます。

### 参考文献

- 荒木峻・沼田真・和田攻編(1985)、環境化学辞典、pp. 1015、東京化学同人、東京
- 有田正光編著(1998)、水圏の環境、p. 14-16. 東京電機大学出版局、東京.
- 今田和史・伊藤富子・吉住善好・栗倉輝彦・米川年三(1980)、支笏湖の透明度、CODおよび数種溶存イオンの変動(1973年~1979年)、水質研報、35、p.21-34.
- 今田和史・伊藤富子・吉住善好・栗倉輝彦・米川年三(1981)、阿寒湖(1973年~1980年)の透明度、CODおよび数種溶存イオンの変動、水質研報、36、p.33-50.
- 今田和史・伊藤富子・吉住善好・栗倉輝彦(1983)、大沼湖(大沼・小沼)の透明度、CODおよび数種溶存イオンの変動(1974年~1980年)、水質研報、

38、p.57-74.

- さけます・内水面水産試験場(2010)、網走川における継続的水質モニタリング調査最終報告書(平成21年度網走市水産振興協議会共同研究)、pp.109.
- さけます・内水面水産試験場(2012)、平成22年度サケ・マス保護水面管理事業調査報告書、pp.20.
- 佐野和夫(1979)、水産養殖と水、pp245、サイエンティスト社、東京.
- G.A.Cole.(1983),Textbook of limnology, 3rd Editin,pp.401,Mosby,St.Louis.
- 半谷高久・小倉紀雄(1995)、新版 水質調査法、pp. 335、丸善、東京.
- 長倉三郎・井口洋夫・江沢洋・岩村秀・佐藤文隆・久保亮五編(1998)、岩波理化学辞典 第5版、pp. 1854、岩波書店、東京.
- 早狩進、「EXCELアドイン工房」、トリリニアダイアグラム作成アドイン、  
(<http://www.jomon.ne.jp/~havakari/>)
- 北海道立水産孵化場(2005)、さけます孵化放流環境保全に関する研究報告書(平成14~16年社団法人北海道さけ・ます増殖事業協会受託研究). pp.336.
- 北海道分析化学会北海道支部(1994)、水の分析第4版、pp. 493、化学同人、京都.
- Meade,J.W.(1989),Aquaculture Management, p. 9 Nostrand Reinhold,NY.
- 日本化学会(1992)、陸水の化学、pp. 188、学会出版センター、東京.
- 日本水産資源保護協会(2000)、水産用水基準(2000年版)、pp. 96、東京.
- 日本水産資源保護協会(2005)、水産用水基準(2005年版)、pp. 97、東京.
- 日本地球化学会編(1978)、水汚染の機構と解析、p. 53-83、産業図書、東京.
- 菅原健・半谷高久(1988)、地球化学入門、pp. 149、丸善、東京.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th Edition(1998), p. 1-21, APHA,AWWA,WEF.
- 東京天文台編(2001)、理科年表、pp. 653、丸善、東京.
- 渡辺智治・安富亮平・今田和史、融雪水が小河川の酸性化とシロサケ稚魚およびサクラマス幼魚の浸透圧調節機能へ与える影響、水質研報、58、p.41-51.
- (やすとみ りょうへい：さけます資源部)  
(いまだ かずし：(社)北海道栽培漁業振興公社)

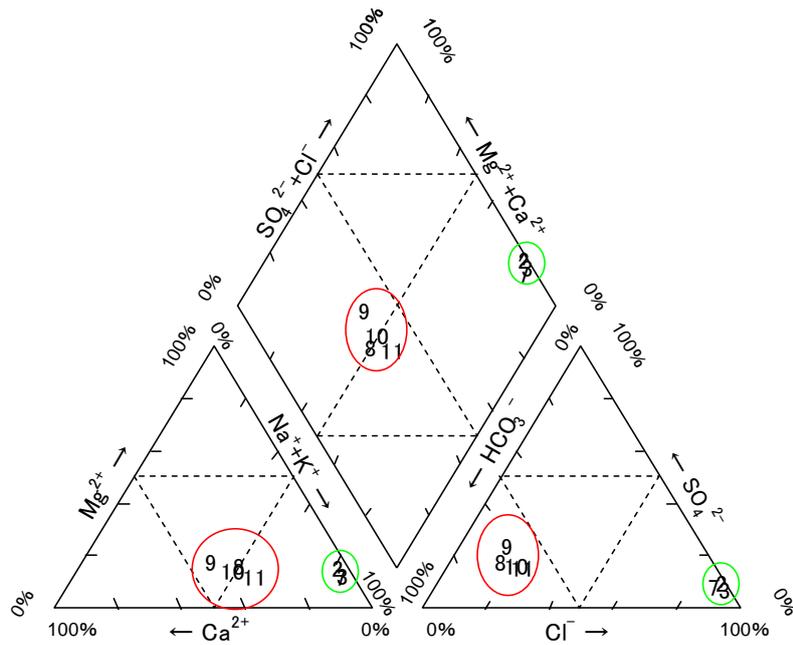
表1 河川、湖沼の水産用水基準 (2005版)

水産用水基準 (2005版)平成18年3月社団法人日本水産資源保護協会より作成

水域/項目	河川		湖沼	
	自然繁殖の条件	生育の条件	自然繁殖の条件	生育の条件
BOD	3mg/L以下 2mg/L以下 (サケ・マス・アユ)	5mg/L以下 3mg/L以下 (サケ・マス・アユ)		
COD			4mg/L以下 2mg/L以下 (サケ・マス・アユ)	5mg/L以下 3mg/L以下 (サケ・マス・アユ)
全窒素	設定なし		1.0mg/L以下(コイ・フナ) 0.6mg/L以下(ワカサギ) 0.2mg/L以下(サケ科・アユ)	
全リン	設定なし		0.1mg/L以下(コイ・フナ) 0.05mg/L以下(ワカサギ) 0.01mg/L以下(サケ科・アユ)	
溶存酸素(DO)	6mg/L以上(サケ・マス・アユは7mg/L以上)			
水素イオン濃度(pH)	6.7~7.5(生息する生物に悪影響を及ぼすほど、pHの急激な変化がないこと)			
懸濁物質(SS)	25mg/L以下(人為的に加えられる懸濁物質は5mg/L以下)忌避行動や鰓蓋運動の以上などをおこす原因とならないこと、日光の通過が妨げられ、植物の同化作用に影響を及ぼさないこと。		サケ・マス・アユ 1.4mg/L以下 (透明度4.5m以上)	温水性魚類 3.0mg/L以下 (透明度1.0m以上)
着色	光合成の妨げとならないこと、忌避行動の原因とならないこと。			
水温	水産生物に悪影響を及ぼすほどの水温変化のないこと。			
大腸菌群	1000MPN/100ml以下			
鉱物油	水中に含まれないこと・水面に油膜が認められないこと。			
有害物質	物質ごとに決められた基準値以下であること。以下に関係分を示した。			
			硝酸態窒素 9mg/L 亜硝酸態窒素 0.03mg/L アンモニア態窒素 0.01mg/L 鉄 0.09mg/L	

	St.A	St.B	St.C	St.D	St.E	St.F	St.G	St.H
St.A	1.00							
St.B	0.55	1.00						
St.C	0.42	0.42	1.00					
St.D	0.42	0.41	0.54	1.00				
St.E	0.28	0.26	0.57	0.76	1.00			
St.F	0.35	0.32	0.65	0.68	0.69	1.00		
St.G	0.37	0.30	0.58	0.82	0.77	0.75	1.00	
St.H	0.32	0.33	0.48	0.67	0.64	0.50	0.71	1.00

図1 濃度相関マトリックスの例(赤い数字は関連が強い)



トリリニアダイアグラム

(番号はサンプル番号、緑の丸は、海水の影響が大きい場合。)

図2 トリリニアダイアグラムの一例 (早狩進氏作成「Excel アドイン工房」のプログラム使用)

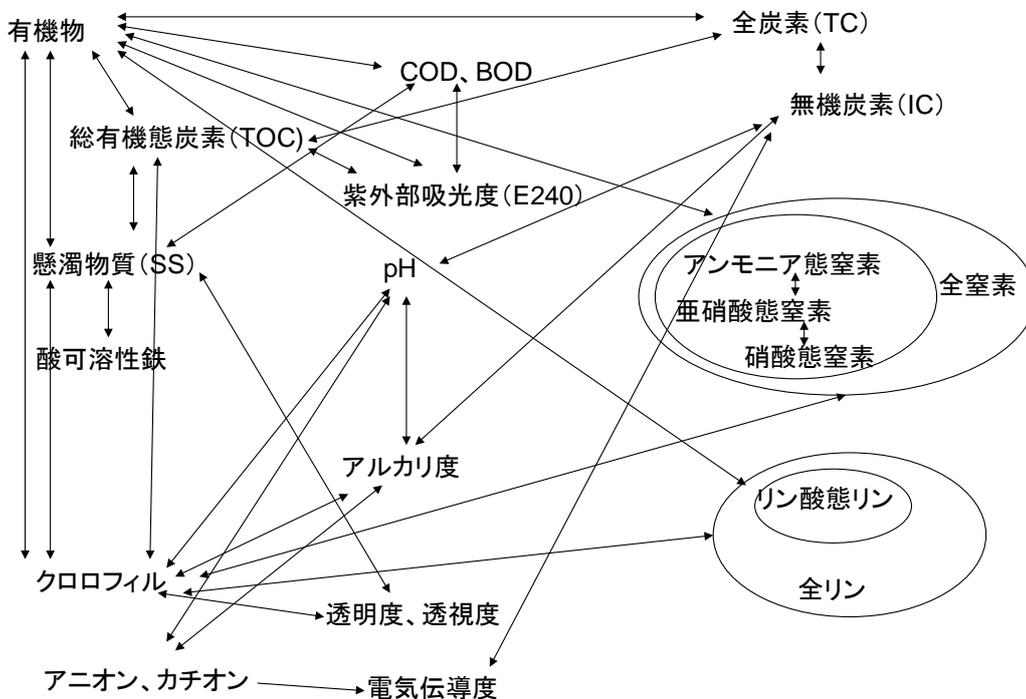


図3 分析項目の相互関係図