

加茂湖およびその周辺の自然環境



【概要】

加茂湖の形成過程と環境の変遷を、地質学的視点から述べる。また、加茂湖の水質について、長期モニタリングデータからその動態を明らかにする。

【ねらい】

新潟県最大の湖で佐渡島の重要な景観でもある加茂湖。その湖底堆積物に残されている記録から、加茂湖の形成過程とこの地域の環境変化を復元し、地質学的な時間スケールでの環境変化を見てみよう。また、湖水の長期間にわたるモニタリングデータから湖水のダイナミックな変化を実感してもらいたい。

船に乗せてもらって加茂湖に出てみよう。船から見る加茂湖は広い。その景観の雄大さにあらためて驚くに違いない。貝喰川で放流されたシロザケ稚魚が成長し、多いときには100匹も遡上する。冬は、無数のカモやカイツブリなどが空いっぱいに飛び回り、そのもとで牡蠣の収穫が続く喜びのシーズンである。かつての湖岸にはヨシの群落が広がっていた。近年の護岸工事ですっかり消滅したが、わずかに残った貝喰川や長江川の河口のヨシ原には、カニの巣穴がそこかしこに見られ、稚魚や水鳥の貴重な生息地になっている。

加茂湖は、牡蠣生産の場であると同時に湖岸を散策する人々の癒しの場でもある。50年ほど前には、湖のあちこちで子どもたちが泳ぎ魚やアサリを取っていた。このようなかけがえのない加茂湖の再生を試みるのが重要で、「よみがえれ水辺」である。

1. 加茂湖の地形および概要

加茂湖は国中平野の北東部に位置し、両津の市街をのせる砂州によって両津湾から隔てられた海跡湖である。現在、両津湾と加茂湖を隔てる砂州の一部が、明治30（1897）年の大水害ののち人為的に掘削され、海水が湖に流入している。

加茂湖の面積は約5km²で全国第46位、新潟県では最大の湖である。湖の大きさは南北方向で約10km、東西方向で最大2kmである。最大水深は約9m、平均水深は約5mで、沿岸部で急に深くなり、

沖合の広い範囲で5～8mの平坦面が広がっている。湖底の深さは北で浅く南で深い（図1）。湖水量は260万m³である。海水は深さ4m、幅30mの水道から最大で0.9m/secの速度（夏期）で6時間ごとの流入流出を繰り返している。最大速度で6時間に流入する水量は、湖水量の約10分の1にも達しており、湖水はほぼ海水である。

流入河川の主なものは、北部の長江川（4.2km）、外城川（4.2km）、貝喰川（3.8km）、南部の天王川の4河川で、いずれも2級河川である。加茂湖に流れ込む河川の流域面積は5430haで湖の面積の約11

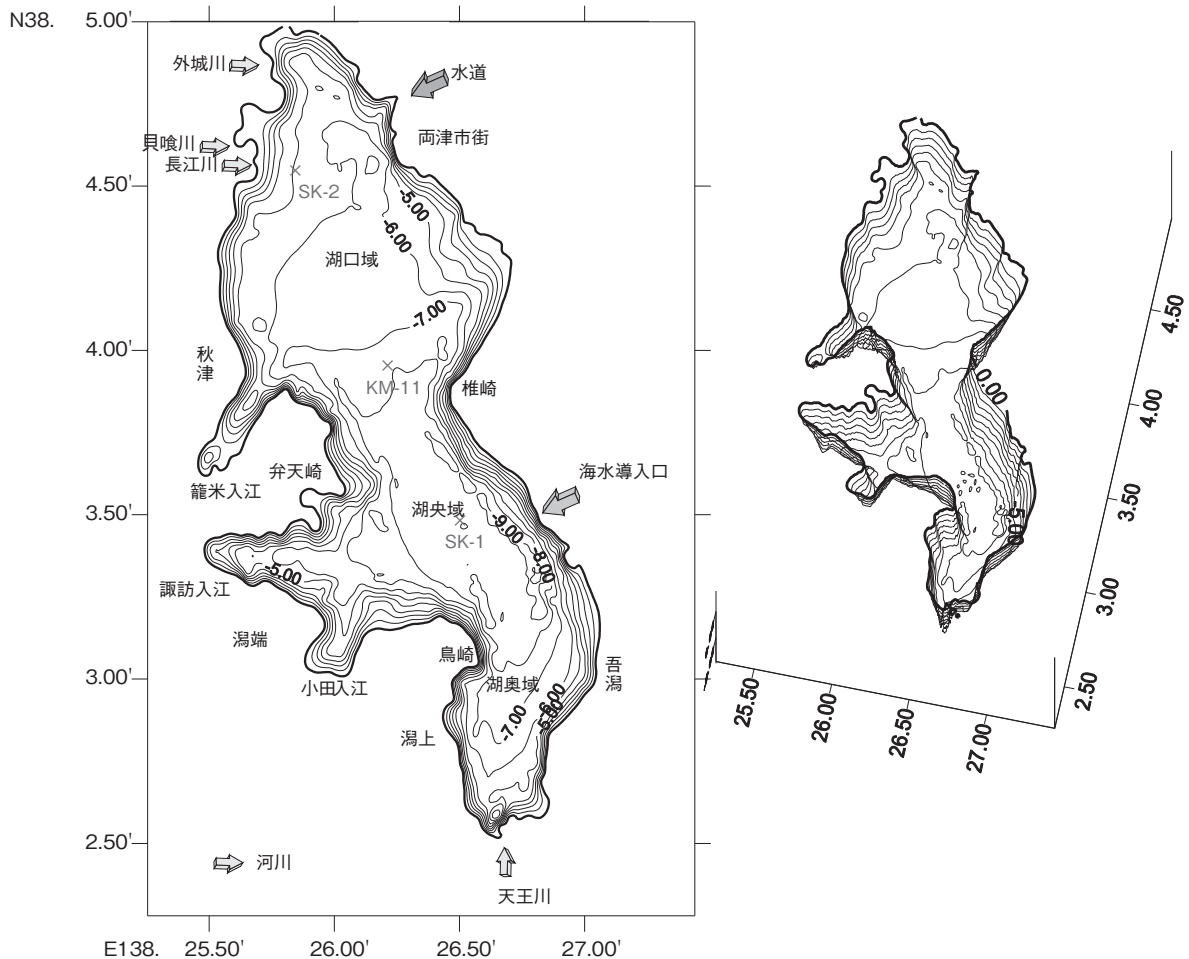


図1 湖底地形図および湖底立体図

倍である。その約3分の1が水田等の耕地で残りは大佐渡山地の森林である。流域の農家は2202戸、流域の人口は10859人（平成5年）である。

昭和初期より牡蠣養殖が盛んに行われ、加茂湖漁協の組合員数は130人（平成20年）、牡蠣の漁獲実績は160～250t、漁業生産額は2～3億円と豊かな湖でもある。1960年代から1970年代にかけて少し富栄養化がすすみ、海水を導入し湖水を若返らせる事業も行われた。富栄養化の程度は一般におもわれているほど悪くはなく、富栄養化は軽微で健全な湖である。過去30年間に全国的に見られる湖沼の人工改変にはすぎましいものがあるが、加茂湖も例外ではなかった。しかし、干拓には深すぎることで、離島にあること、湖の周辺の人口が少なかったことなどが幸いし、面積的には大きな変化はみられない。

2. 加茂湖のおいたち

加茂湖は典型的な海跡湖である。海跡湖とは、沿

岸流や波浪の作用で砂州がのび、海湾の一部が外海から分離されてできた湖のことである（図2）。全国に45カ所ほどある主要な海跡湖の一つに挙げられている。縄文海進期に両津湾の奥部にある時期から砂嘴がのび、やがて砂嘴がつながって砂州となり、砂州によって両津湾から分離され、湖となったのである。現在の両津市街は、加茂湖と両津湾をわける砂州の上に発達している。この砂州を構成している砂は、梅津川や久知川によって大佐渡山地や小佐渡丘陵から運び出され、沿岸流や波浪によって海底を移動してきたものである。このような作用は現在も進行中であり、たとえば新しい防波堤の建設で浜が浸食されたり、逆に、別の場所に新しい浜ができたりすることがよく観察される。

■2-1 細粒砂が砂州をつくる

山地から河川によって運ばれてくる碎屑物はその大きさによって、礫、砂、泥に区別される。巨礫や大礫は、河川が山地から出たところで運搬力が衰えて堆積し、扇状地をつくる。河川が海に達すると、

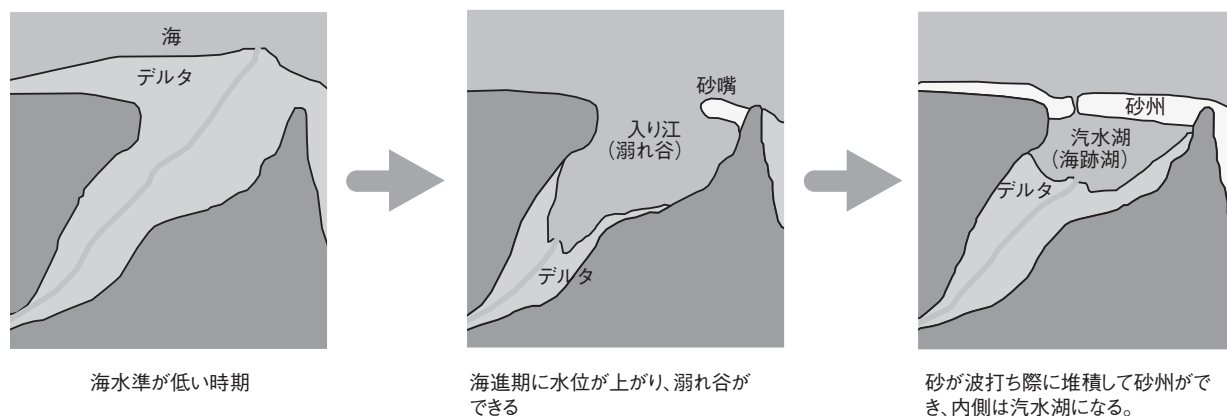


図2 海跡湖ができるまで

河川の運搬力は急速に衰え、中礫や細礫も移動できなくなってその場に堆積し、三角州をつくる。ただし、佐渡島のような小規模の地域では、扇状地と三角州が一体となり両者の区別はつかないことが多い。

砂は、浅い海底を自由に移動する。砂の中で細粒砂はもっとも移動しやすく、晴天時の波のエネルギーでも時間をかければ、およそ 20m 程度の深さまで移動できる。暴浪時のように波のエネルギーが非常に大きい場合、細粒砂は、80～100m 程度の深さまで移動することもある。それ以上の深所では、海底土石流などの現象を除いて、砂が移動することはない。細粒砂より大きい粗粒砂は、晴天時の波のエネルギーで、せいぜい 5m 程度の深さまで移動できる程度である。一方、泥の粒子は、晴天時で波の作用が及ぶ水深約 20m よりも浅い海域では常に動かされていて、沈積と定着ができない。したがって、泥はおよそ水深 20m より深い沖合の海底に堆積する。このように礫、砂、泥の粒子の浅海域での動きは大きく違い、砂の粒子だけが浅い海底を波浪や沿岸流によって比較的自由に移動する。移動を繰り返しながらある場所に砂碕をつくったり、またすぐ別の場所に移動したりしながら、最終的に沿岸流の衰える場所に定着する。これが砂州である。

■2-2 海面変動と砂州の移動および成長

海面の高さは、年間を平均すればほぼ一定であるが、数十万年の時間スケールで見ると $\pm 100\text{m}$ の範囲で変化している。海面の上下に伴って砂粒子の移動できる空間も変化するので、砂州の位置も変化する。一般的には、海面が上昇すれば砂州は山側で成長し、海面が下降すれば標高の低いところに後退する。このような変化は地層の中に記録されて残るこ

ともあり、世界各地で確認されている。また、湖底の堆積物には長期間にわたる環境変化がタイムカプセルのように記録されており、それを解析して環境変化を復元することができる。これらは近年の地球温暖化を考える基礎データとしても注目され、非常に重要なものである。

立石ほか (1997) は、ユニブームと呼ばれる音響探査装置を使って、現在の両津市街が乗っている砂州の数千年規模での成長の様子をとらえた。また、Van Lap Nguyen ら (1997) は、湖底ボーリングの解析により詳細な環境変化を復元している。

砂州を形成した細粒砂は、湖底から深さ 10～20 m にかけて、椎崎から湖心に向かって北東方向に進進しながら堆積している。図 3 のボーリング柱状図 KM-11 で 10～22 m に発達する細粒砂層、中粗粒砂層がこのような形成された地層である。時代は約 6000～約 5000 年前で縄文時代に相当する。この砂州の形成とともに SK-1 地点は入り江の奥となり、洪水時に広がったシルトが堆積した。SK-2 地点では長江川、貝食川、外城川の三角州ができた。砂州が完成すると、加茂湖の全域に一樣にシルトや粘土が堆積した。ときどき砂州が破壊されたりして、入り江や潟や湖の環境変化が繰り返されてきた。

■2-3 海面の上昇速度と海水準変動の周期

およそ 1 万 8000 年前に現在の海面より 80～100m も低かった海面が、約 1 万年間でほぼ現在と同じ水準にまで上昇した。深い入り江だった加茂湖周辺はその間でほぼ埋め立てられ、今から約 5000 年前には浅い水域となり、完全に埋め立てられた部分は低地になったのである。このときの平均海面上昇速度は、次のように計算でき、1 年間で 1cm

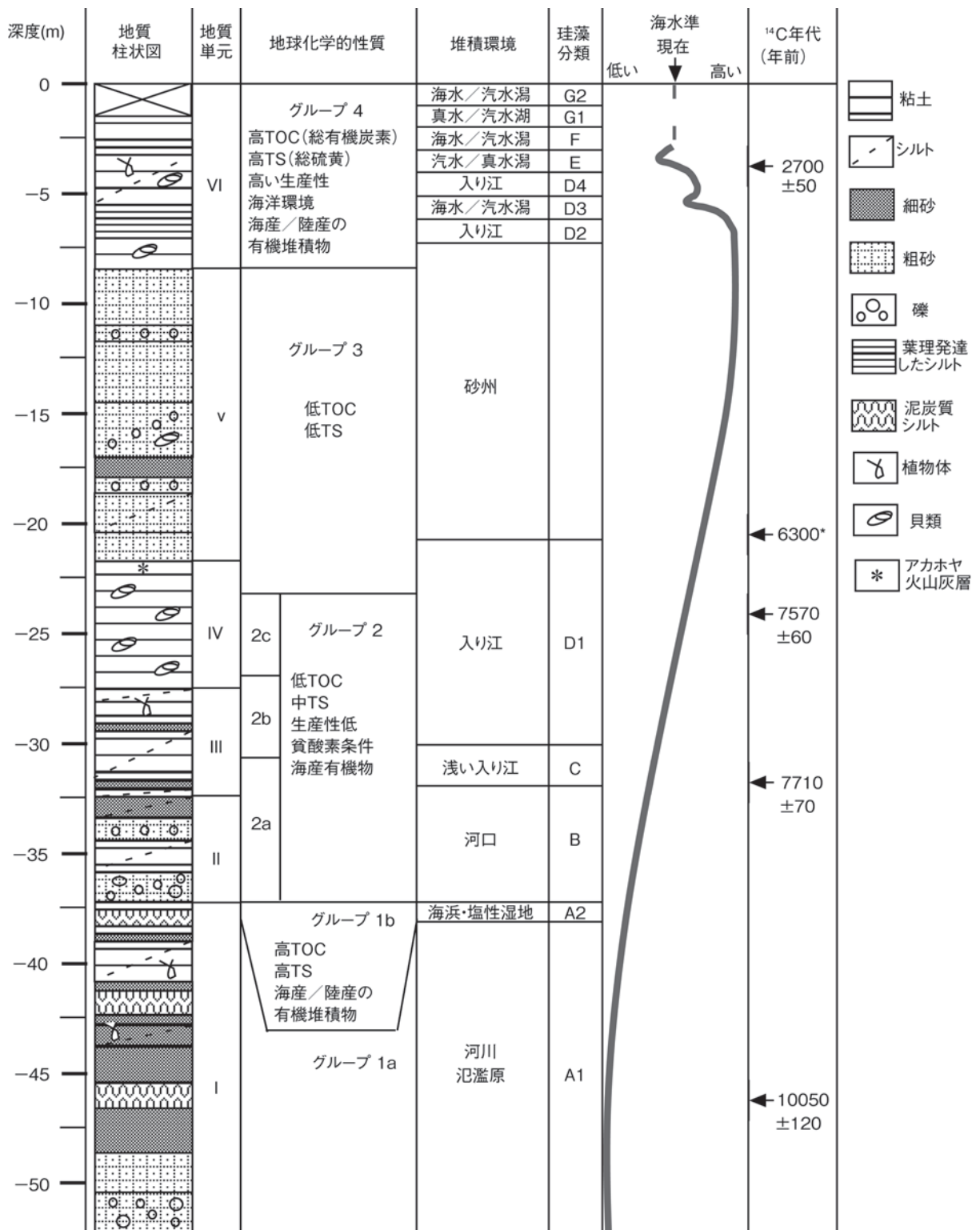


図3 加茂湖湖底堆積物による環境変化(湖口域南部 KM-11 の調査結果) Van Lap Nguyen (1998) を改変。ボーリング位置は図1 参照。

にも達する急激なものである。

ある。この速度は、

$$100\text{m}/10000\text{年} = 10000\text{cm}/10000\text{年} = 1\text{cm}/\text{年}$$

$$1\text{m}/100\text{年} = 100\text{cm}/100\text{年} = 1\text{cm}/\text{年}$$

近年、二酸化炭素等の増加による地球温暖化が問題になっている。それに伴う海水準上昇量の推定値はまちまちであるが、最大値は100年で1m程度で

であり、先ほどの値にほぼ等しい。この速度は自然現象でなく人為的な現象であり、その大きさには驚くばかりである。

1万年で100mに達する海面上昇は、世界的に確認でき地球規模で起こった現象である。今から1万8000年前は、最終氷期の最盛期である。気温は今より約8℃程度低く、北アメリカ大陸の半分は、数千mの氷床でおおわれ、現在の南極大陸のような状態であった。大量の海水が氷となって大陸に固定されたため、海水面が現在よりも100m程度も下がっていたのである。逆に、約5000年前の縄文時代前期～中期は気温が約2℃程度高く、氷河がとけて海水面は今より4～5m高かった。

このような気候の変化がおおよそ約10万年周期で数十回も繰り返されたことが、南極大陸の氷床ボーリングコアや深海底の堆積物をボーリングして得られるコアに含まれる有孔虫化石から、酸素同位体曲線（註1）の変化としてわかっている。これらの同位体変化曲線は海水の表面温度の変化を示すもので、海水面の変動そのものを示しているのではない。海水面そのものがどう変わったのかは、陸地の地殻変動による基準そのものが変化しているため把握が困難なことが多いが、ここ約数百万年の間に海面の表面温度に比例して、海水面が今より数m高い時期と100m程度も低い時期が約10万年周期で繰り返され、さらに10万年周期の変動のなかに2万年程度の周期の小さい変動があったことは確実である。このような気候の変化の原因は、ミランコビッチサイクル（註2）と呼ばれ、太陽の回りを公転する地球の軌道がもたらす周期的変化と考えられている。

3. 激しく変化する湖水の特性

海水と淡水の中間の塩分を持つ水のことを汽水という。通常、海水1ℓ中にとけ込んでいる塩分は30

～35gであり、淡水は0.5g以下である。したがって、汽水は1ℓ中に0.5～30gの塩分を含む水ということになる。汽水を特徴とする水域を汽水域という。汽水域は砂州などで海と隔てられた沿岸潟湖（coastal lagoon）や大きな河川の河口などにみられる。前述のように加茂湖は沿岸潟湖で広大な汽水域である。汽水域は地形やその形成過程からみてわかるが、面積が広い割合には浅く、集水域の末端にあるため栄養塩類が集まりやすい。また、太陽エネルギーは水塊全体に十分行きわたるので、植物プランクトンの繁殖には絶好の条件を揃えている。豊富なプランクトンを求めてそれを食べる水生動物が集まり、さらにそれを利用する人間や鳥たちも集まって豊かな生態系が成り立っている。ところが、その豊かさは微妙なバランスの上に成り立っており、環境因子が大きく変わりやすいのが特徴である。一回の観測だけで加茂湖の全体を把握するのは困難であり、広範囲に全水深にわたって長期間の観測をして、はじめて動的な全体像をとらえることができる。

加茂湖の湖水特性を知るために、比較的簡単に測定可能な水質パラメーターの水温、塩分濃度、湖水密度、溶存酸素量、透明度、phなどのパラメーターによって湖水の変化を眺めてみよう。これらのパラメータの解説については、コラムを参照されたい。

■3-1 水塊の動きと水質

加茂湖自然環境調査研究グループ（1999）、両津高校理科部（2000）、神蔵ほか（2003）は、加茂湖の詳細な連続観測によって、水塊の動きと水質特性の変化をとらえている。加茂湖の水塊の特性は、断面図などを使用して少なくとも二次元的に表すべきであるが、概要を知るため一観測点での年変化を図4に示した（巻頭口絵XVI参照）。観測点はボーリ

（註1）有孔虫化石と酸素同位体曲線……

有孔虫は、石灰質の殻を持つ原生生物の一群で、海に殻が堆積して石灰岩をつくるもとになる。有孔虫の化石は種類が豊富で出現頻度も非常に高いので、地質学や古生物学、古環境学で非常に重要な指標となっており、近年では化石の殻の中の酸素安定同位体（ $\delta^{18}O$ ）の比を測定することで過去の気候を推定することができる。

（註2）ミランコビッチサイクル……

地球物理学者ミランコビッチ（Milutin Milankovi）は1920年代に地球に入射する日射量の長周期変化を精密に計算した。ここから予測される長期的な日射量変動パターンをミランコビッチサイクルと呼ぶ。地球の公転軌道の離心率と自転軸の傾きの周期的変化、さらに自転軸の歳差運動という3つの要因によって地球の日射量は変動し、それに伴って海進・海退が生じる。理論計算によると、周期は約2万年、約4万年、約10万年という3つに大別できる。

ングSK-1が行われた地点で、湖央域の加茂湖の最大水深を示す位置にある。

図4aは両津でのアメダス記録から日最高気温を、図4bは水温、図4cは月別降水量、図4dは塩分、図4eは密度、図4fは溶存酸素量と透明度、図4gはphの各測定値をそれぞれ等値線で表した。グラフの等値線が縦方向に立っていれば、湖底から表層までが同じ状態にあり、等値線が横方向伸びていればその期間に上下方向に成層構造（水深に沿って水の性質が変化すること）が存在していることになる。

(1) 水温について

4年間における全観測地点の最高水温は31.9℃で、最低水温は6.0℃でいずれも湖水表層の値である。年間の水温の平均値は17℃程度と推定され、年間の気温の平均値より3℃程度高い。表層水温の変化幅は湖底水温の変化幅より大きい。一年のうちで温暖な3～9月では表層水温が湖底水温より高く、密度成層状態（冷たく重い水が湖底に、暖かく軽い水が湖面に分布した成層状態）となっている（図4b*の赤下線）。逆に10～2月は湖底水温が表層水温より高い（図4b*の黒下線）。表層と湖底の温度差は、2～3月で1℃以下と小さく、4～9月は湖水表層が3℃程度高く（最高記録は6℃）、10～12月は湖底水温が3℃程度高い（最高記録7℃）。年間の平均では湖水表層が湖底より約0.7℃高い。

一般に、温度分布は湖内の水や物質の循環を考える上で重要な目安とされている。湖面から湖底までの温度差がほとんどない期間は、水の密度の差も上下方向であり違いがないので、大陸からの季節風や大型低気圧の接近などで湖面が攪乱されると湖面と湖底の間で容易に水が循環（ターンオーバー）して、これと同時に様々な物質が上下方向に移動する。例えば、酸素は湖面から湖底方向に輸送され、逆に、湖底に堆積した有機体や栄養塩類は湖面方向に拡散する。一方、密度成層状態が生じている時期は湖面と湖底との物質循環が起りにくい。ただし、加茂湖の場合は汽水湖であり、水温だけではなく塩分濃度も水の比重に大きな影響を及ぼす。このため、むしろ水の比重を直接計測した方が直接的に水の動きを予測できる。

(2) 塩分について

4年間における全観測地点の塩分の平均値は、表層で26psu、湖底で32psu、全層平均で30psuと高く、実質的には海水といえる数値であった。湖口域、湖

央域、湖奥域の地域差は、湖底と全層でほとんど見られないが、表層は湖口域で1psuほど低い。7～8月に湖底の塩分がわずかに高くなる（図4d*の赤下線）。冬季の降雪降雨や梅雨秋雨の降雨の多い時期に湖水上半部の塩分がやや低下する。図4dに見られる極端に低い表層塩分は、1998年8月4日の記録的大雨（後述）によるものである。

(3) 密度について

4年間における全観測地点の密度の平均値は、表層で17.8σ_t、湖底で22.5σ_tであった。全層平均は20.8σ_tと両津湾の海水に近かった。湖口域、湖央域、湖奥域の地域差は、湖底と全層でほとんど差は認められなかったが、表層では湖口域が1σ_tほど低い値を示した。湖底の密度は3～4月にやや大きくなっていった。

加茂湖での温度と塩分の変動範囲では、海水の密度は温度変化より塩分変化の影響を大きく受けていた。表層より湖底の湖水密度が大きくなる密度成層が認められる時期を図4f*の黒下線で示した。湖水表面の温度が下層の温度より下がる時期を含めて、年間を通して上下方向の移動が起きていないことがわかる。しかし、10～11月頃に湖水の上層と下層の密度差が小さくなり（図4fの等密度線で縦の直線が現れる時期に）、そこに強い北西の季節風が吹くと年に一回だけ上層と下層の入れ替えが起き、湖水が一気に均一状態となっていることがわかった。

(4) 透明度について

4年間における全観測地点の透明度の平均値は4.5mで、水深の最大値の約50%に達しており良好であった。加茂湖での透明度はプランクトン量に反比例すると考えられ、湖央域から湖奥域にかけてやや小さくなる。これは、湖奥域に栄養塩類が溜まりがちなことを意味している。

10～11月に湖水が攪拌され、湖底や湖水下層にあった栄養塩類が湖水全体に広がるが、3～4月になると温度条件と光条件が回復し、プランクトンが一斉に増殖をはじめて透明度が低くなる。また、別の要因で栄養塩類の流入があると、加茂湖が多少富栄養気味であることもあって異常なプランクトンの増殖に結びついて透明度が減少する。図4ft*に透明度が5m以下が出現した時期を赤線で示す。

(5) 溶存酸素量について

4年間における全観測地点の溶存酸素量の平均値は、表層で88%、湖底で42%、全層平均で69%と

良好であった。溶存酸素量の平均値は、観測点の南端北端で水深がとくに浅いところを除くと、観測点から両津湾と加茂湖を結ぶ水道までの距離および観測点の水深に関係して規則的に変化し、湖口域、湖央域、湖奥域に対応する3グループに区分できる。湖口域では全層の平均値が73%であり、年間を通じて溶存酸素量は非常に大きい。水道に近づくにしたがって溶存酸素量の平均が高くなっている。湖央域の全層の平均値は61%で3区域の中で最も低い。この部分の水深が深く、夏期に30%以下の低酸素層が出現することが平均値を低くしている。湖奥域の全層平均値は62%で湖央域より多少高い値を示すが、水深を考慮するとこの部分の溶存酸素量は実質的に最も低いともいえる。

湖底の溶存酸素量が30%以下になる低酸素状態が夏期に水深の深い湖央域で頻繁にみられた。図4f*に湖央域で溶存酸素量30%以下が現れた時期を赤下線で示した。他の場所では例外的に見られるのみであり、加茂湖全体から見れば局所的な現象といえる。1998年8月4日の大雨のあと8～10月まで湖底の溶存酸素量は連続して0%であったのに対し、表層の溶存酸素量は連続して上昇をつづけ10月には120%に達する部分がみられ、上層と下層のコントラストが明瞭であった。この大事件は項をあらためて述べる。

(6) pHについて

4年間における全観測地点のpHの平均値は、表層で8.1、湖底で7.8、全層平均で8.0であり、両津湾の海水と同程度であった。pHの表層平均値と湖底平均値の差は、湖口域の海水の出入りする水路から遠ざかるほど大きくなり、湖央域と湖奥域で一定となる。湖央域と湖奥域でのpHの低下はこの湖域で有機物の分解量が多いことを示している。

■3-2 「8.4 水害」で加茂湖に何が起こったか

1998年8月4日の豪雨で起きた災害は、通称「8.4水害」と呼ばれ、島内に林道崩落や堤防決壊など多くの被害をもたらした。相川の総雨量は相川測候所での観測史上第5位で1990年から8年ぶりの豪雨、両津の総雨量は両津での20年間の観測史で最高であった。両津の総雨量(194mm)を相川測候所の1911年からの約90年間の観測データと探して比較してみると、1978年の185mmをしのいで第一位となる。同日の県内他所の総雨量は、新潟(265mm)、

入広瀬(220mm)、両津(194mm)、新津(171mm)であった。ところが、これらと対照的に佐渡島内でも二つ亀(26mm)と羽茂(3mm)ではほとんど雨が降らなかった。停滞前線に沿った文字通りの「集中豪雨」だったのである。普通、年に数度の大雨でも日雨量はせいぜい30～40mmなので、その6～7倍の雨量である。しかも、5日前の7月30日には72mm/日、2日前の8月2日には71mm/日の降雨があったので、それも含めれば300mmを超える雨が僅か一週間で降ったことになる。これは、災害を起こすのに十分な雨量である。

このような豪雨の記録は、佐渡島の歴史上全くなかったわけではない。本庄了寛の「佐渡水難実記」にある明治30(1897)年水難がそれで、死者86人、流失破壊建物937棟という信じられない規模のものであった。瞬間雨量として約6分間で一斗樽が一杯になったと記録されている。この明治30年水難の降雨量は、今回の両津の総降雨量を遙かにしのいでおり、数百年に一度の規模のものと思われる。このときの総雨量は推定できないが、日本における過去最大級の集中豪雨である昭和32(1957)年の諫早豪雨(長崎県)が24時間で1109mmであり、未曾有の大災害となった明治22(1889)年の十津川水害(奈良県)が約1000mmと推定されていることを参考にすれば、それに近い規模だったのであろう。ただ、このような記録を加味したとしても、佐渡島にとって8.4水害時の豪雨が百年に一度の規模であったことは間違いない。「このとき加茂湖はどうなったのか」はぜひ記録しておく必要があるだろう。

(1) 加茂湖周辺での被害

加茂湖の北側では、藤津川が大佐渡山地南縁の国中段丘分布域から沖積平野に出た箇所ですべて決壊した。決壊した部分は石積みコンクリート製で河川改修済みであった。堤防決壊のやや上流では、堤防の上を水が乗り越え水田に流れ込んだ。国道350号線付近では、水田を埋め立て新しい商店などが建てられているが、大人の腰程度の深さまで冠水し、国道350号線は通行不能となった。藤津川西岸の水田約100haは一面の泥海となり、揚水機的能力不足も指摘された。藤津川ダムは満杯状態で、ダムのすぐ下では土砂崩れが見られた。藤津川ダムは洪水防止の役には立たなかったのである。また、長江川も国道350号線の加茂湖側で決壊した。

加茂湖の南側では、旧新穂村中心街の裏で大野川が決壊した。一部破損23棟、床上浸水76棟、床下浸水840棟である。この上流には、利水・治水を目的とした大野川ダムがあるが、これも洪水防止の役には立たなかった。旧両津市東立島地区では、地区の中央を流れる河川が規模の小さい土石流を起こした。さらに住宅裏の竹林が崩壊したことにより、全壊2棟、半壊2棟、一部破損2棟などの大きな被害があった。この地域は、小佐渡丘陵南麓の急傾斜山地が迫っており、地形・地質的に土石流災害に弱い地区である。

(2) 加茂湖の変貌

豪雨翌日の8月5日午後、筆者らは湖奥域から観測をはじめた。鳥崎をすぎると湖面のあちこちに緑色の葉がついたままの竹が16本も生えおり異様な光景である。湖岸の竹林が崩壊しており、その竹が流れだし、根をつけたまま釣りのウキのように浮かんでいるのである。おびただしい木片やゴミなどが浮かんでおり、一面の泥の海であった。船外機が見えない棒などに当たりエンジンが止まるものだから、氷山に向かって進むタイタニックの心境に似て甚だ気味が悪い。

豪雨の翌日およびその後4ヶ月の加茂湖環境の変化を、水質断面図で追いかけてみよう。豪雨10日前の1998年7月25日の断面図を図5-1に、豪雨翌日の1998年8月5日の断面図を図5-2に、生物相に影響が出始めた1998年9月5日の断面図を図5-3に、牡蠣被害が最大に達した1998年10月24日の断面図を図5-4に、豪雨の影響が消えた1998年11月28日の断面図を図5-5にそれぞれ示した。ここでは、紙面の関係で、溶存酸素量と透明度のみを示し、水温、塩分濃度、密度は文章で説明する。グラフの横軸は調査位置を示し、湖口域の両津湾に通じる水路脇(2E)から湖奥域南端の天王川河口(18H)まで、ほぼ等間隔の17地点で南北方向に並んでいる。縦軸は水深で50cm間隔で計測している。

(3) 豪雨翌日8月5日の水質

豪雨翌日の加茂湖の水質は、溶存酸素量、水温、塩分、密度、pHの全測定項目において、深度1.5mを境界とし明瞭に二分された。1.5mより浅い部分は洪水の影響を強く受けて淡水に近い層(以下B層と呼ぶ)となり、1.5m以深は洪水の影響が少なく洪水以前の湖水の状態を残している海水に近い層(以下A層と呼ぶ)であった。

大規模な洪水が発生したにもかかわらず、B層の厚さは意外にも薄かった。1998年1月から7月までの調査でも、7月を除き、1m程度(2月)、2m～3m(3月)、1m～2m(4月)、1m程度(5月)、2m程度(6月)と存在しており層厚は大差ない。ただし、塩分濃度は大きく異なり、今回の10psu以下(これは真水に近い)に対し、2～6月は16～26psuであり約2倍の差があった。

一方、溶存酸素量(DO)は、最高値94.0%～最低値0.1%を示した。断面図(図5-2)では水深1.5mから上に溶存酸素量80%から100%の層が薄く広がっている。透明度は、0.3～0.9m、平均0.8mと非常に低い。もちろん流入した泥水のためである。深度6m以深にはDO10%以下を示す部分が広がっていた。この層は10日前の調査では存在しなかったもので、豪雨による水の濁りで光条件が悪化し、植物プランクトン類の光合成速度が低下して酸素濃度が減少、さらに呼吸によって酸素が消費されたことが原因で生じたものである。湖底全域で酸素不足層の広がり大きく、呼吸で生じたCO₂によってpHは低下した。光を遮られるとたった1日でこれだけ変化するものかと驚くばかりである。ここからプランクトンの光合成による酸素発生量は非常に大きいことがわかる。

(4) 1か月後、生物相に影響が出始めた

豪雨からちょうど1か月後の9月5日、溶存酸素量は最高値115.3%～最低値0.1%を示した(図5-3)。表層から深度1.5mの部分には、DO90%～115%(過飽和)を示す高酸素濃度層が湖全域に広がっている。また、同様な高酸素濃度層が湖の北半部の深度4m付近にも広がっている。これら的高酸素濃度層は植物プランクトンの大増殖によるもので、船からも肉眼で湖表面のプランクトンを無数の白点として認めることができた。いやはやすごい。この大増殖は洪水によって流れ込んだ栄養塩類が引き起こしたのだろう。一方、深度5.0m以下にDO10%以下の低酸素濃度層が全域で認められ、この規模の大きさは観測開始から最大規模となった。漁協の話によると、すでに小規模ながら牡蠣に被害が出始めている様子であった。透明度は平均2.9mと回復し、表層の泥粒子は沈殿したもの、一年前の同時期に比べ半分程度である。塩分量は、8.4豪雨で表層1.5mが10ppt以下の淡水に近い状態となったが、この1か月(8月5日～9月5日)で、23～

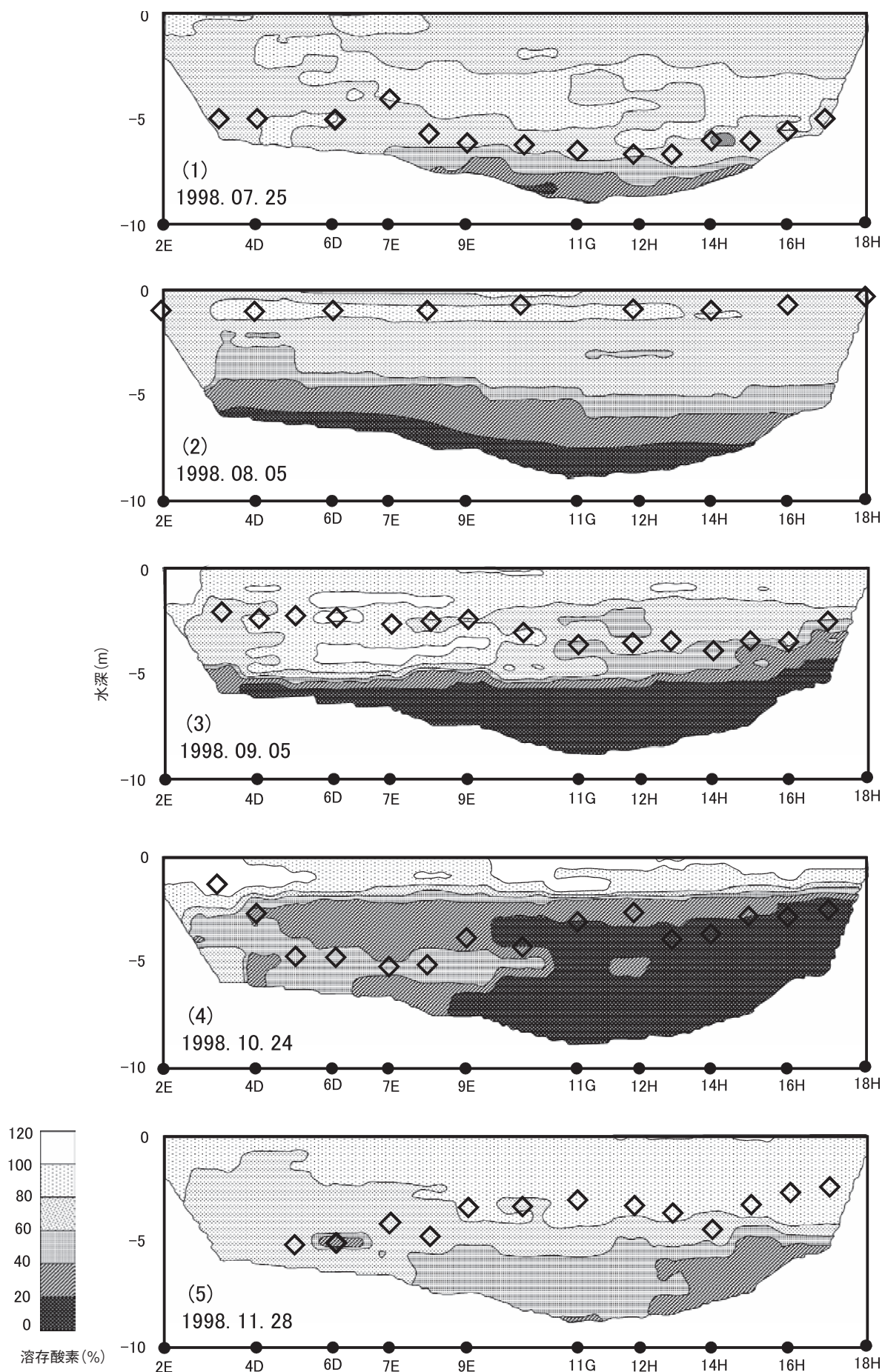


図5 溶存酸素と透明度の水質断面図の8.4水害前後の変化 (4-1: 1998年7月25日、4-2: 同8月5日、4-3: 同9月5日、4-4: 同10月24日、4-5: 同11月28日)

25pptにもどっている。1.5m以深の塩分には大きな変化がみられない。

(6) 牡蠣被害が最大に達した

豪雨から2ヶ月半後の10月24日、溶存酸素量は最高値147.2%、最低値0.0%を示した。表層～深度1.5mに依然、DO 90%～140%を示す高酸素濃度層が広がっている。先月(9月)よりやや少ないが、船から肉眼で湖表面のプランクトンを無数の白点として認めることができた。これとは正反対に、深度3.0m以下にDO 30%以下の低酸素濃度層がほぼ全域で認めらる。この規模の大きさは先月を遙かに上回っており、観測をはじめてから最大である。

漁協の話や新聞報道によると、牡蠣の被害は過去最悪で、生産量は例年の3割程度になりそうとのこと。引き上げられた牡蠣を見ると、場所により違いがあるが、2～3m以下の牡蠣はほとんど死んでいる。また、牡蠣が死んでいる部分にはホヤやフジツボが全く付着しておらず、牡蠣なわの上下で差が明瞭である。調査当日、湖口域で透明度が急に3m以下と半減し「湖水黒色化現象」が認められた。また、10月末から約3週間にわたって渦端沖～湖奥域のとくに西岸を中心として「湖水赤色化現象」が続き、ウナギに似た長さ20cm直径数cmの魚が湖岸で多く死んでいたり、岸に跳ね上がってのたうちまわっていた。同時期に、エビが湖岸近くの浅所まで移動してきて、新しい巣をつくり始めているのも観察できた。これらの現象については、湖の上下方向の密度差が少なくなると同時に強い北西の風が吹いて、下層の硫化水素を含む水塊が上昇してきた可能性もある。

透明度は平均で3.5mと前月の2.9mより多少回復傾向にあるが、地域により異なっている。湖奥域は3m前後で悪化、湖央から湖口域で4m～5mと大きく回復、4D、3D、2Eの北部3地点では急に3m以下に半減した。湖奥域では溶存酸素量と透明度ともに深刻な状況である。密度は表層1.5～2.0mを境に二分される。表層1.5mに低密度層が明瞭に存在している。高密度層はかなり均質でありほぼ低酸素層に一致している。確かに、強風があれば一部で低密度層を突き破る水塊の上昇が起きるかもしれない。

(7) 豪雨の影響が消えた

11月28日は、11月にしては天気はよいのだが早朝から強風で、調査中止を考えたほどであった。密度断面図の上下の密度差は前月に比較して小さく

なっており、このところの強風で水塊の攪拌が進んだことがわかる。このことは溶存酸素量断面図にとくに明瞭で、高酸素濃度層と低酸素濃度層の両方が完全に消えてしまった。8.4豪雨の影響が消えるのに約4ヶ月も要したことになる。

4. よみがえれ水辺 ―加茂湖およびその周辺環境の長期的展望―

地域住民にこれから必要とされるものは、山地を覆う豊かな森林、そこから流れ出すサクラマスが遡上するような清冽で水量豊かな河川、広大な湖沼、豊かな海、心休まる田園風景である。これら必要とされるものの多くはすでに佐渡島に存在しているか、ほんの少しの努力で復元できるものが多い。これらのうち広大で豊かな湖沼として加茂湖のもつ意義は大きい。筆者らは、長く加茂湖周辺の地質、加茂湖の湖底地質、加茂湖水質の連続観測にかかわってきた。この間加茂湖のとくに水質の現状をどう捉えればよいのかを考えてきた。マスコミを中心に多くの出版物やおおかたの佐渡島住民がイメージする加茂湖は「かなり汚れており、将来の展望がない」である。しかし、これらは時々報道されるマスコミの論調を受けただけのものであり、実際の調査結果に基づいているわけではない。確かに、市街地周辺の湖畔はゴミが見え、とても泳げるような状況でないが、全体としては一般に言われているほど汚染が進んでいるわけでもなく、これからの努力で再生は十分可能と思われる。

最近の100年間、干拓を中心に消滅してしまった湖沼は数多い。消滅にいたらずとも湖沼面積の減少や人工湖岸の建設などで、自然のままの湖沼を見ることは北海道を除いてほとんどない。加茂湖もその例外でないが、幸い、離島にあることと流域人口の少なさが幸いし、湖岸面積の減少や汚染の程度も比較的軽微といえる。このような過去百年間の全国の湖沼のたどった歴史を考えると、新潟県第1位の大きさをもつ加茂湖が、昔からほぼそのままの大きさで、現在も残っている意義は大きい。将来間違いなく佐渡市・新潟県の貴重な財産となるであろう。

■4-1 加茂湖湖水の現在

すでに述べた加茂湖水質連続観測から理解できたことのひとつは、気象変化を除くと加茂湖の水質

が、主としてプランクトンの増殖によって決まってしまうことである。言い換えれば、加茂湖自然環境復元の基本方針は、湖に流れ込むチッソ、リンを中心とする栄養塩類を制御することである。どの程度のチッソ濃度、リン濃度が理想値であるかという点については、湖の生態学的・化学的・水文学的な総合調査が必要であり、現在の段階では不明なことも多い。しかし、以下に述べるようにチッソ濃度とリン濃度を下げる必要性自体は明らかである。

1998年8月4日豪雨によって、養殖牡蠣の斃死が70%に達し過去最大の不作となった。この原因は十分解明されていないが、表層の低塩分層を中心に発生した豪雨後数ヶ月にわたるプランクトンの異常増殖が主な要因である可能性は高い。過去の記録からも大雨の後の牡蠣の斃死が増加する傾向が報告されている。このプランクトンの約3ヶ月の長期間におよぶ異常増殖は、低塩分層に供給され長期間安定に存在する栄養塩類が原因の一つである。とくに、濁水中の土壌粒子に付着した栄養塩類が問題となった可能性が高い。さらに、10月末から目立ってきた湖央から湖奥域にかけての西岸に見られた「湖水赤化現象」は約3週間継続した。これは、水温の低下に伴って湖水の上下方向循環が部分的に開始され、それに伴って貧酸素層に存在した硫化水素が上昇してきたものだろう。

この豪雨は百年に一度の記録的なものであった。上に述べた牡蠣被害が豪雨と平行し百年に一度であれば天災としてあきらめざるを得ないが、実際の牡蠣被害の頻度はそれ以上に頻繁に生じているので、チッソ濃度とリン濃度を下げる必要があることになる。また、一方で、牡蠣養殖が加茂湖の湖水から栄養塩類を一番多く系外にとり出しているという観点も重要であり、水質浄化の面からも牡蠣養殖を今後も続ける必要は大いにある。

2009年10月台風通過後、加茂湖に水質異常が起こり、大量のカキが死滅するという被害が起きた。湖水が茶色になり、湖奥域で青白くなり、異臭が発生、魚が死ぬという現象（青潮）が起きた。調査の結果、茶色の水の正体は貝類に被害を及ぼす植物性プランクトンの一種（ヘテロカプサ類）であることがわかった。カキの大量死は、加茂湖湖底から栄養塩類（特に有機リン）が溶出し、台風18号で貧酸素層が攪拌され青潮が発生、ヘテロカプサ類の大発

生となったというメカニズムである。貧酸素層が発生するとリン化合物の溶出が起こることは良く知られており、これを防ぐ目的で行われたヘドロ浚渫工事は、目的を達することが出来なかったことになる。

図6は、新潟県による「公共用水域の水質測定結果（新潟県ホームページ <http://www.pref.niigata.lg.jp/kankyotaisaku/1254822231356.html>）」の佐渡島と新潟市の弁天橋をグラフにしたものである。加茂湖のCOD変化は測定データのある1970年代から大きな変化が見られなかったが、平成14年(2002年)ぐらいからわずかに上昇傾向にあり、CODが3をこえる値が出る年も見られるようになった。この原因は明らかになっていないが、検討すべき問題点として、①公共下水道完成地域での公共下水道利用率の低迷、②牡蠣養殖漁業者と養殖筏台数の減少、③公共下水道事業のおくれ、などが考えられる。

■4-2 チッソ・リン流入量をどこで削減するか

加茂湖の汚濁負荷量のうち生活系は、「流域の公共下水対策工事が開始され、将来的に処理水は加茂湖に流入しないことになっている」と考えてきた。しかし、近年の公共下水道事業の遅れをみると楽観的な態度は間違いと思うようになった。ここで浄化槽の利用と公共下水道事業の関係を考察し、公共下水道事業は、「過去約50年間にわたる富栄養化の相当部分を根本的に解決する画期的なもの」であることを説明する。

富栄養化現象は加茂湖に流れ込む河川の流域における単独浄化槽・合併浄化槽の利用と深く関連している。戦後すぐの時代には、し尿を畑などの肥料として利用していたので、チッソ・リンなどの栄養塩類は畑とヒトとトイレの間を循環するだけで加茂湖には流れ込むことは少なかった。

合併浄化槽の働きを一言でいうと水洗トイレからの汚水（し尿）や台所・風呂などからの排水（生活雑排水）を微生物の働きなどを利用して浄化し、きれいな水にして放流するための設備である。また、単独浄化槽はトイレの汚水だけを処理しきれいな水とする設備である。ここで「浄化」とか「きれいな水」に注意が必要である。単独浄化槽や合併浄化槽はBOD（生物化学的酸素要求量）やCOD（化学的酸素要求量）で表される汚れを栄養塩類にまで分解し「きれいな水」にする装置であるが、栄養塩類を取り除く装置ではない。浄化槽から流れ出た水を地下浸透や自分の池・水

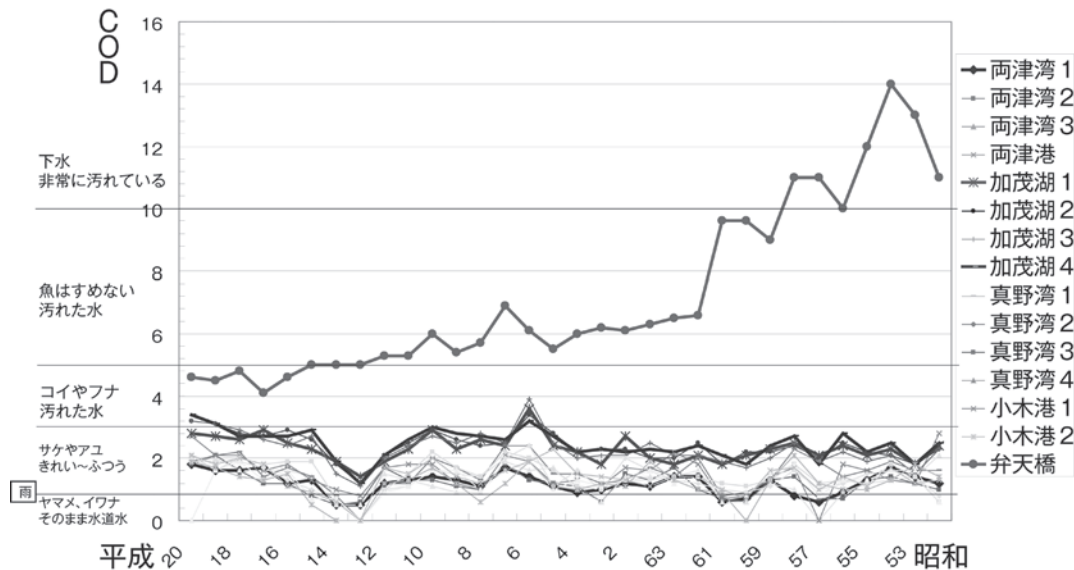


図6 CODの変化 公共用水域の水質測定結果（新潟県による）

田・湿地に放水せずに河川に流すと「きれいな水」に含まれるチッソ・リンなどの栄養塩類が加茂湖に流れ込むことになる。これが「きれいな水」による加茂湖の富栄養化現象である。近年、高度処理型（窒素・燐・BOD 除去率の高い型）浄化槽が使われ始めたが、旧型浄化槽との更新はほとんど進んでいない。

公共下水道整備は、処理後の栄養塩類を含んだ水を加茂湖に流し込まないので、加茂湖の富栄養化にはつながらない。したがって、過去50年の懸案の相当部分を根本的に解決する画期的な事業といえる。「きれいな水」による加茂湖の富栄養化のメカニズムと公共下水道整備の画期的な意義を理解できれば、流域の人々は経済的負担にも耐えられると思われるが、住民の理解不足の感はいなめない。また、行政の理解不足の感も強く、この画期的意義を考慮しなかったため、湖底浚渫事業などなどの諸事業は失敗した。また、このメカニズムの「よごれた水」と「栄養塩類が溶けたきれいな水」の違いを理解するのに中学・高校程度の化学的知識が必要なことも富栄養化問題解決の遅れにつながっている。この教育と宣伝が重要である。

次に、非点汚染源（とくに農業系の排水）を考えてみよう。過去30年間の河川工事、農業排水路の整備により、加茂湖流域の降雨が短期間に大量に加茂湖に流れ込むようになった。これらの施策は農業生産性向上の点から必要であった。加茂湖周辺に30～50年前まで残されていた広いヨシ原も開発が

進み、湖岸の間近まで道路・農地が迫っており、栄養塩類の流入は30年前に比べかなり増加している。これでは、加茂湖の富栄養化は当然である。しかし、近年はその影響を相殺するような措置をとることが世界的に行われる時代となっている。

前述の豪雨による溶存酸素量の変化に代表されるように、大がかりな機械や装置をもってしてもプランクトンの光合成による溶存酸素量の増加にかなうものはない。同様に、チッソ・リンの系外排出も、水辺生物による生態学的方法によるのが最良で経済的にも安価である。そこで、加茂湖に流入する河川と耕作放棄田を中心に100ha程度のヨシ原を復元することを提案したい。ここを蛇行河川・感潮河川・塩性湿地・人工入り江・藻場・浅瀬につくり替える。現在のコンクリート湖岸を撤去し、湖底と陸地との移行帯（エコトーン）に改修するのである。この浅くて広い水域には、ヨシのほか多様な生物・微生物が成育するので、多様な生態系ができあがり、野鳥・水鳥の生育場となる。ヨシの刈り取りと野鳥・水鳥の食餌によってチッソ・リンを系外に排出する。この区域に現存車道以外には車道を設置せず、歩道のみとし、豊富な自然の残る人々の親水空間をつくる。このような取り組みは、宍道湖や霞ヶ浦など先進的地域ですでに始まっており、今後の加茂湖の将来計画の基本的立場としなければならない。



水質観測で用いられるパラメーターについて……

(1) 溶存酸素量（単位：％または mg/l）

DO（dissolved oxygen）と略記される。100％が酸素の飽和状態、0％が無酸素状態である。単位は％のほか mg/l を使う場合もある。植物プランクトンの光合成によって簡単に増加し、その呼吸によって減少する。また、植物プランクトンの死後その分解に酸素が使われ減少する。DO は化学的方法によるほか、最近開発された専用のセンサーを使って電氣的に短時間で読みとることができる。センサーが湖底の泥の中に入ってしまうと 0％となる。

DO が 2mg/l（2ppm と同じ）を切ると魚介類には危険とされている。2mg/l は、だいたい DO の 30％に相当する。栄養塩類が豊富で光条件が良好であると、植物プランクトンが異常に増殖し、その光合成によって溶存酸素量が 100％を超す場合がしばしば見られる。酸素が過飽和の状態に続くと、大量に発生したプランクトンが死滅し、その分解に酸素が消費され、酸素不足に反転することがあるので望ましい状態とはいえない。年間通して溶存酸素量が 80％～30％程度で推移していれば理想的である。

(2) 透明度（単位：m）

直径 20cm の白色円盤（セッキ板と呼ばれる）を沈め、それが見えるまでの深さをいう。透明度の 2～2.5 倍の深さになると水中に入った光は約 1％までに減少することが知られており、この深さではプランクトンの光合成量と呼吸量がおおむね等しくなる（補償深度という）。これより深くなると呼吸量が大きくなって酸素が消費され、貧酸素水塊が形成されるので有気呼吸をする生物は死滅する。

透明度は湖水中のプランクトンの存在量の目安としても重要である。例えば、透明度が 10m もあってどこに行っても湖底が見えることがある。この状態は加茂湖の湖水が綺麗で「めでたい状態」だけでなく、プランクトンが生育しておらず「死んだ湖」であることを意味する。また、透明度が 2～3m だと湖底から順々に貧酸素状態ができることになるので、プランクトンの異常繁殖であるといえる。加茂湖の最深部は約 10m だから、透明度が年間を通して 5m 程度あれば湖底での光条件に問題がない。

(3) 水温（単位：℃）

文字通りの湖水の温度である。生物の育成状況と湖水の密度を決める重要因子である。

(4) 塩分（単位：psu）

塩分は汽水域の環境を議論する上で重要な因子である。本来の定義は「水中に溶けている塩類の重量比」であり千分率で表された。単位は‰（パーミル）や ppt である。近年、電気伝導度計の測定値から換算して求める方法（実用塩分という）が一般的になった。実用塩分の単位は psu で表す。34psu は 34ppt と数値的には同じで、％濃度を 10 倍した値と考えてもよい。普通の海水は 30～34psu ぐらい、淡水は 0 psu である。20psu は汽水であるが、ほとんど海水という感じでとらえてもよく、加茂湖は簡単に「海水湖」といってもよいくらいだ。

(5) 密度（単位： σ_t ）

湖水の重さを表す。一般の密度は ρ_t (g/cm³) で表すが、海水の密度は ρ_t の代わりに σ_t を用いる。両者の関係は $\sigma_t = (\rho_t - 1) \times 1000$ である。常温における海水の密度は、 $\rho_t = 1.020 \sim 1.031$ g/cm³ であるので、 $\sigma_t = 20 \sim 31$ となる。海水の密度は、湖水の温度と塩分濃度から計算で求めることができる。海水と淡水の密度差は、数値としては小さいが、淡水と海水は簡単に混合しない。これは本当に驚くほどである。長江川などから流れ出た淡水は、湖の表面をスイスイと流れていくのがよく観察された。

よく知られているように水は 4℃で密度が最大になり 0℃で凍る。4℃以上の水では水温が上がると、ちょうど風呂の水が沸いていくときのように軽くなった温かい水が表面に浮かぶ。このように軽い水が重い水の上に載っている状態を密度成層という。淡水湖の場合、秋から冬にかけて表層の水が冷えていくときには表面に温度の下がった重い水が作られるから、下の水と入れ替わろうとして対流が起こり、水温がほぼ一様の混合層ができる。

ところが海水ではたいぶ様子が異なる。海水の密度は塩分と温度の両方によって決まり、塩分濃度が同じであれば温度が低いほど密度は大きくなり、0℃での密度が最も大きい。このように淡水と海水の特性は大きく異なっており、中でも海水の凍り方と淡水の凍り方に大きな違いがある。最近、加茂湖の凍結は観測されていないが、古老の話では凍った湖を歩いて渡ったこともあったとされている。このような状態の湖水の密度分布の観測記録が知られていないのは残念である。

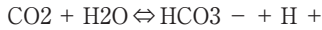
(6) pH

酸性やアルカリ性の程度を表す数値。pH=7 が中性、海水はいろいろなものが溶けているので普通 pH=8.1 ぐらい、薄い食

酢は pH=3.0 ぐらい、石鹼水は pH=10 ぐらいである。pH は温度によっても変化する。

湖水の pH は水中に溶けている二酸化炭素量によってほぼ決まると考えてよい。もし湖水の温度がどこでも同じなら、光合成によって二酸化炭素が吸収されると下式の化学平衡が左に進み湖水はアルカリ性となる。また、湖の低層で有機物の分解や呼吸によって二酸化炭素が増加すると化学平衡は右に進んで湖水は酸性となる。湖水の温度がほぼ均一のとき、溶存酸素量の断面図と pH の断面図を書くとき似たパターンの図ができる。

光合成は上層で有機物の分解は下層で進むから、湖水の pH は上層でアルカリ性を示し下層で酸性を示すことが多い。



本格的な水質測定では、このほかにも、COD（化学的酸素要求量）、BOD（生物学的酸素要求量）、溶存無機イオン濃度（陽イオン、陰イオン、遷移金属）、DOC（溶存性有機炭素）等が測定されるが、紙面の関係で割愛する。

— 引用文献 —

- 1) 小林巖雄・神蔵勝明・鴨井幸彦・渡辺剛志 1993 「佐渡島加茂湖の自然環境とその歴史」地質学論集 39 : 89 - 102
- 2) 立石雅昭・田村嘉之・神蔵勝明・Nguyen Lap Van・小林巖雄・松岡和弘 1997 「加茂湖湖底地形と浅層地下地質」科研費研究成果報告書（代表研究者 立石雅昭）平成 9 年 3 月 p.5-34
- 3) Van Lap Nguyen and Iwao Kobayashi, 1997 : Diatom Flora and paleoenvironment of Late Pleistocene and Holocene deposits of Lake Kamo, Sado Island, Central Japan, 同上研究成果報告書 平成 9 年 3 月 40-74
- 4) Van Lap Nguyen and Masaaki Tateishi and Iwao Kobayashi, 1988 : Reconstruction of Sedimentary Environments for Late Pleistocene to Holocene Coastal Deposits of Lake Kamo, Sado Island, Central Japan. The Quaternary Research 37 (2) 77-94
- 5) 斎藤文紀・井内美郎・池田国昭・横田節哉・羽坂俊一・松本英二・赤松守雄 1996 「環日本海における地球温暖化の影響評価に関する研究、研究成果報告書（代表研究者 斎藤文紀）平成 8 年 6 月
- 6) 加茂湖自然環境調査研究グループ 1998 「佐渡島加茂湖の水質と底質環境」Laguna（汽水域研究）5、p.137-152
- 7) 神蔵勝明・新潟県立両津高校理科部・小林巖雄・立石雅昭 2003 佐渡島加茂湖の水質—1997～2001 年の水質断面図— Laguna（汽水域研究）10 p.47-56

★本節にかかわる活動の事例や学習のポイント

これらの内容は、付属の DVD - ROM に収録しています。

<内容>

■学習展開事例：水質モニタリングと富栄養化実験によるプランクトン群集の観察