

阿寒湖の水質環境の現状

安富亮平、渡辺智治、隼野寛史、眞野修一

調査の目的

近年、北海道の主要漁業生産湖沼でワカサギやヒメマスの漁獲量が減少し、このことが地元組合の存亡にもかかわるなど内水面漁業の大きな問題となっています。

阿寒湖のワカサギは、かつて100トン前後の漁獲があったものが、最近では10-30トンまで低下し、2008年に59トンまで持ち直したとしても、全体的な傾向として減少傾向が認められています。

このような、漁業資源の減少原因として、周辺の開発・整備等による水質などを含めた湖水環境が変化したことが主なものとして考えられていますが、環境変化と漁獲量の関連性についての検証はいまだ充分になされていません。このため、湖沼の生物生産の根源となる植物プランクトンの作る基礎生産を測定し、これを指標とし湖沼の生産力評価を行ない、現在の減少した漁獲量を各湖沼に適した水準まで引き上げ、資源を持続的に利用するための管理手法を提言することを目的とした調査研究を行っています。ここでは、その中から、阿寒湖の水質及び基礎生産量の現状と漁獲量の関係について明らかになったことを報告します。

調査の内容および方法

調査の内容

- (1) 水質環境調査
 - 水温、水質のモニタリングとその変化の把握
 - 栄養塩類、イオン類の水深ごとの変動
- (2) クロロフィル a 濃度
 - 植物プランクトン量変動
- (3) 基礎生産量調査
 - 安定同位体による基礎生産の測定
 - 水深ごとの生産量の変化
- (4) 動物プランクトン調査
 - 動物プランクトン量の変化の把握
 - 種の同定と、量の変化
- (5) 漁獲量調査
 - 漁獲物の量と大きさの把握
 - 漁獲量、平均体長の時期的な変動
- (6) 気象条件の把握
 - 風速、日照、気温の変化

以上の内容で阿寒湖の調査を実施しました。

調査の方法

阿寒湖の調査地点を図1に示しました。この地点は従来から行われている公共用水域水質測定調査地点 (Sta. 2) です。調査は、平成18年5月15日、6月20日、7月24日、8月28日、9月25日、10月23日、11月27日、平成18年2月5日、5月23日、7月24日、10月24日、平成20年1月29日の12回実施しました。採水は、0、2.5、5、10、15、20、30mで行い、それぞれの水深の水温、COD、栄養塩、アニオンとカチオン、総鉄、クロロフィルa、フェオフィチンなどについて測定および分析を実施しました。そのほか、調査地点のプランクトン組成調査、漁獲日誌等による漁獲量調査も実施しました。また、2007年5月23日、7月24日、10月24日については、上記の調査のほかに、採水水深での、安定同位体¹³Cを使用した現場法で基礎生産量を測定しました。

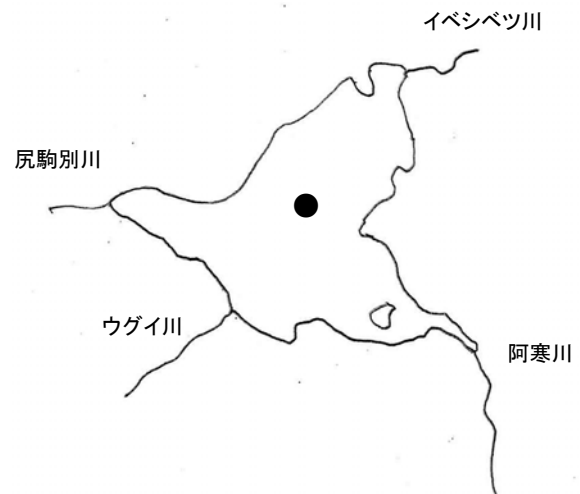


図1 阿寒湖の調査地点

結果と考察

(1) 水質環境調査

調査地点の水深ごとの水温の変化を図2に示しました。

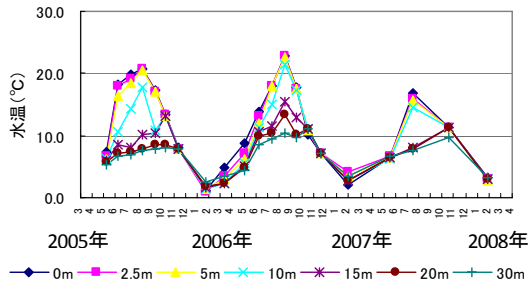


図2 水深ごとの水温の変化

春と秋に表層から底層まで水温がほぼ同じになる循環期が存在していることがわかります。この時期は水の密度が表層から底層までほぼ同じになりますので、容易に上下の水の混合が起こると考えられます。春の循環期と秋の循環期の間には、ある水深から急に低くなる水温躍層といわれる層ができる時期があります。それが成層期と言われます。この時期は、水塊の上下混合が起きにくくなります。また、秋の循環期と春の循環期の間にも、表面水温0℃、底の水温が4℃となる時期があります。これは逆成層と言われ、この時期もまた、水塊の上下混合が起きにくくなります。図2ではあまりはっきりしていませんが2月にそのような逆成層の傾向がみられます。

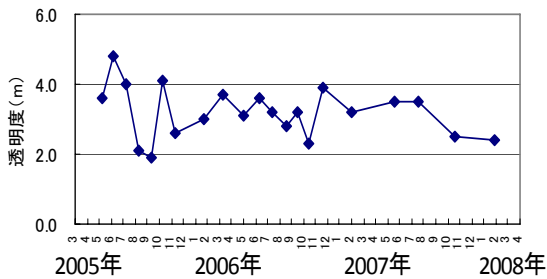


図3 透明度の変化

図3に透明度を示しました。2005年6月23日に4.8mと最大値を示し、2005年9月26日に1.9mと最低値を示しました。平均値は3.2mでした。

栄養塩は、リンと窒素があり、リンは溶存態のリン酸イオン、窒素は、溶存態のアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素があります。アンモニア態窒素は、酸素がある場合、酸化されて亜硝酸態窒素をへて硝酸態窒素になります。魚に対して毒性があるのは、アンモニア態窒素と亜硝酸態窒素です。硝酸態窒素の毒性を表す濃度は高く、通常環境では問題となりません。また、リンと窒素の栄養塩のバランスによりアオコが発生しやすい環境となることが知られています。

図4にリン酸イオン、図5にアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素を示しました。

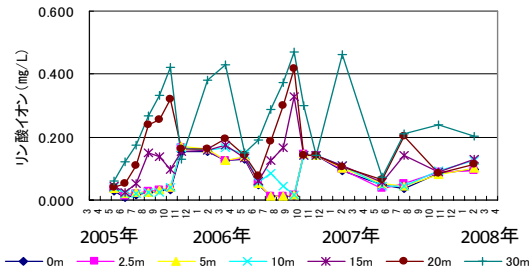


図4 リン酸イオンの変動

リン酸イオンは、底層で濃度が高くなる傾向があります。夏季と冬季にこのような高い濃度が検出されています。これは夏季の水温の上昇とそれに伴う成層と底泥の有機物の分解などによるリンの溶出が起きていると考えられます。また、冬季は表層が結氷し、表面の水温が4℃より下がることで、水の密度が低くなるという逆成層の傾向がみとめられます。このために、底層の水が滞留し上記と同じ原因でリン酸イオン濃度の上昇が起きていると考えられます。

図5-1,2に各種溶存態窒素の濃度変化を示しました。アンモニア態窒素は、循環期を除いて30mが他の水深より濃度が高くなっています。とくに冬季結氷時の停滞期においては0.3mg/Lの高い濃度を示しています。

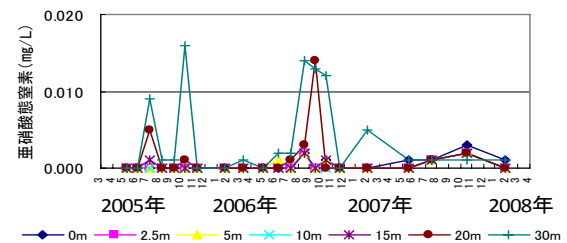
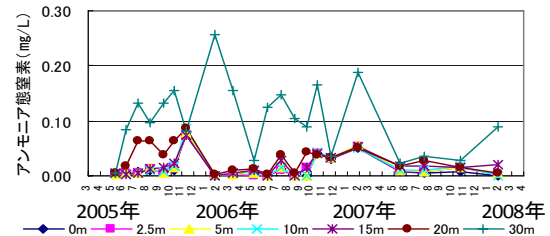


図5-1 溶存態窒素濃度の変化

(アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素)

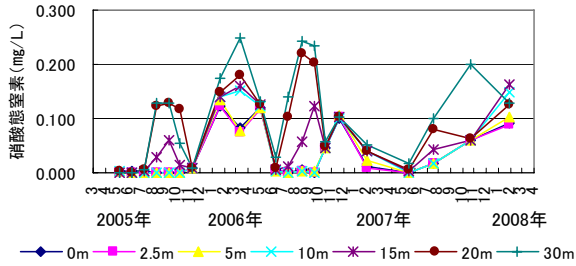


図 5-2 溶存態窒素の濃度変化(硝酸態窒素)

また、夏場の表層では濃度が低いことがわかります。これは、植物プランクトンの増殖に使われているものと考えられます。亜硝酸態窒素は 20m、30m で高い濃度が測定されていますが、その他の水深では検出されません。

硝酸態窒素は、冬場で表面から底まで、夏場 15m 以深で濃度の上昇がみられます。最大濃度でも 0.3mg/L を超えないことがわかります。これら窒素の濃度は、底層での濃度が高い傾向にあるのがわかります。この理由として、夏場の表層では光合成により窒素が消費され濃度が低下し、底層では有機物の分解により酸素が消費され、窒素が溶出していくと考えられます。

酸素濃度を図 6 に示しました。水温と同じように、成層が起きている場合、水塊は、上下混合が起こりにくく、このため滞留した状況で底泥中の有機物などの分解がおこり、底層のリンと窒素濃度が高くなります。つまり、アンモニア態窒素は有機物の分解で生じ、酸素がある状況では、バクテリアにより酸化されて亜硝酸態窒素をへて硝酸態窒素と変化します。また、リンと鉄は、酸素があると結合状態で存在していますが、酸素がなくなると鉄からリンが外れて水中に溶出していきます。このことが底層でおきていると考えられます。

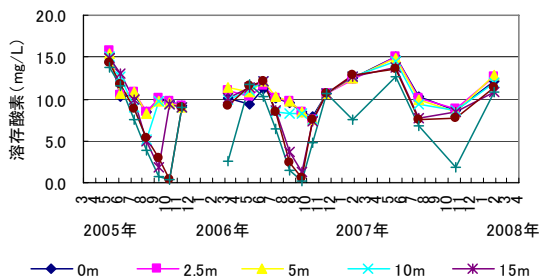


図 6 溶存酸素濃度

溶存酸素は循環期には、表面と底の濃度がほぼ同じになっているのがわかります。また、リンと窒素の栄養塩も酸素が低下している底の部分で濃度が高くなっている傾向が見られます。2006 年の 2 月に 30m でアンモニア態窒素が高くなっていますが、この時期は溶存酸素が欠測状態になっています。次の 3 月の 30m の溶存酸素が低いことからおそらく 2 月も底での溶存酸素濃度は低かったと考えられます。このように、水温、溶存酸素、栄養塩濃度は関連し合っていることがわかります。

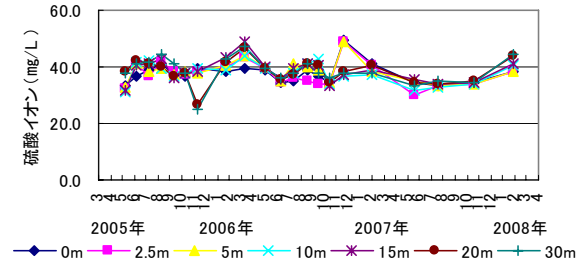


図 7 硫酸イオン濃度

硫酸イオンは、硫化物鉱床からの溶出水、温泉水の中に多く含まれています。24.9～49.4mg/L で最低値は 2005 年 11 月 24 日の 30m、最大値は 2006 年 11 月 27 日の 0m で、平均濃度は 38.1mg/L でした。

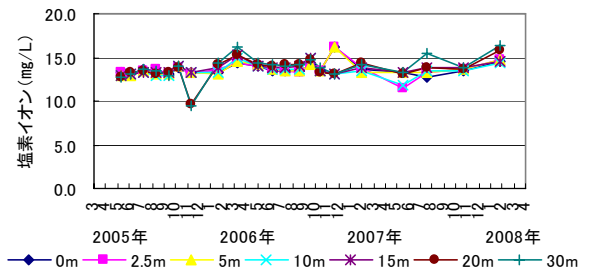


図 8 塩素イオン濃度

塩素イオンは、温泉水に多く含まれています。9.5～16.4mg/L で、最低値は 2005 年 11 月 24 日の 30m、最大値は 2008 年 1 月 29 日の 30m で、平均濃度は 13.7mg/L でした。

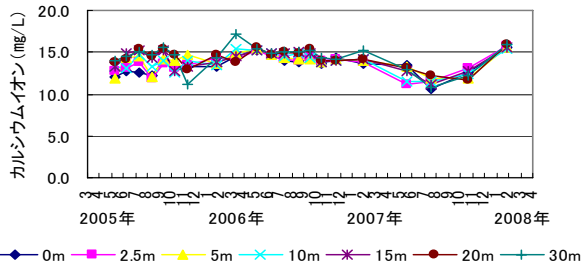


図9 カルシウムイオン濃度

カルシウムイオンは、石灰岩を含む地層からの水に多く含まれています。10.7～17.2mg/Lで、最低値は2007年7月23日の0m、最大値は2006年3月23日の30mで、平均濃度は13.9mg/Lでした。

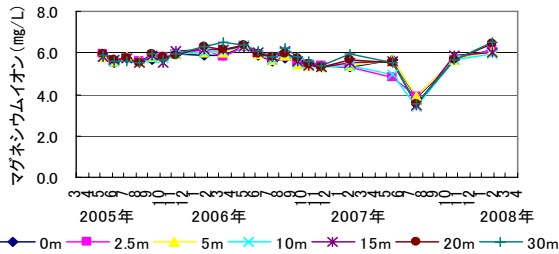


図10 マグネシウムイオン

マグネシウムイオンは、マグネシウムを含む岩石土壌の風化したものからの溶出水に多く含まれます。3.4～6.5mg/Lで、最小値は2007年7月23日の10m、最大値は2006年3月23日の30m、平均濃度は、5.7mg/Lでした。この7月23日の濃度の低下は、20日から23日にかけて降水があったので、それと関係があるかもしれません。

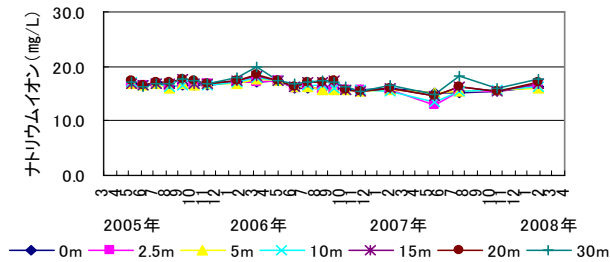


図11 ナトリウムイオン濃度

ナトリウムイオンは、塩化ナトリウムを含んだ岩石からの溶出水、温泉水に多く含まれています。12.9～20.0mg/Lで、最小値は2007年5月23日の2.5m、最大値は2006年3月23日の30m、平均濃度は16.5mg/Lでした。

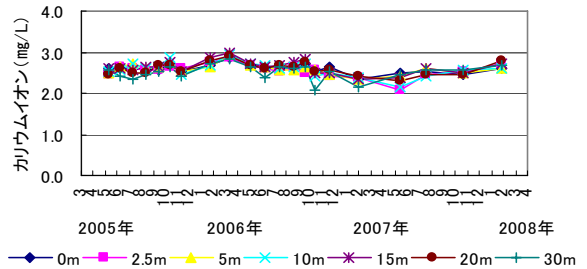


図12 カリウムイオン濃度

カリウムイオンは、花崗岩等の風化したものからの溶出が多く、夏には植物によって土中のカリウムが吸収されるために流水中のカリウムイオンが低下するといわれています。2.1～3.0mg/Lで、最小値は2007年5月23日の2.5m、平均濃度は2.6mg/Lでした。

以上の結果から、硫酸イオン、塩素イオン、カルシウムイオンとも2005年の11月24日の30mで濃度の低下と2006年の11月27日の0～5mで、硫酸イオン、塩素イオン濃度の上昇が認められました。これらの変化は他のイオンでは認められませんでした。また、2007年7月23日の0～30mまでのマグネシウムイオンの低下も特徴的です。これも他のイオンでは認められない変化です。このイオン類の濃度は水の性質を知る上でも必要です。また、これとは別にアルカリ度を測ることは次のトリリニアダイアグラムを書く場合必要になってきます。また、分析の精度を見ることもアルカリ度を測ることによって解ります。このアルカリ度はpHを4.8まで下げるのに必要な硫酸量から計算します。pHが中性付近にある場合、水中の重炭酸イオンHCO₃量とほぼ等しいといわれています。図12にアルカリ度の変化を示しました。

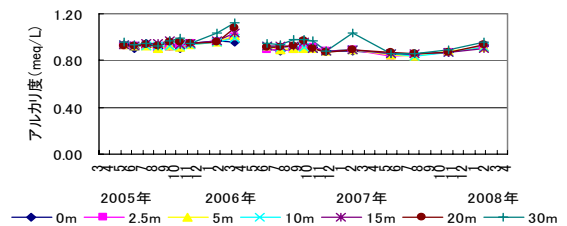


図13 pH4.8 アルカリ度の変化

アルカリ度は底層で上昇する例が見られましたが、水深、調査時期による大きな変化はないことがわかります。0.84～1.12meq/L、最小値は2007年5月23日の2.5m、2007年7月23日の5、10m、最大値は2006年3月23日の30m、平均値は0.92 meq/L (ミリ当量/L) でした。

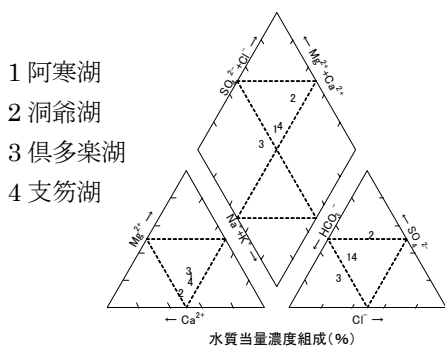


図 14 各湖沼のトリリニアダイアグラム
(早狩進氏作成アドイン使用)

これまでに述べたイオン濃度とアルカリ度がわかれば、トリリニアダイアグラムがかけます。図 14 は阿寒湖のほか、参考のために加えた、洞爺湖、倶多楽湖、支笏湖のトリリニアダイアグラムです。イオン類の濃度から等量濃度を計算して、矢印の方向に 0 から 100% の割合になるように図示したものです。阿寒湖と支笏湖は、同じ位置にプロットされているので、イオン割合が似ています。また、阿寒湖はナトリウムとカリウム、マグネシウム、カルシウムイオンの割合が倶多楽湖のイオン割合とにており、硫酸イオンと塩素イオン、炭酸イオンが洞爺湖と倶多楽湖の中くらいの割合にあることが解ります。塩素イオンは 4 湖沼で構成割合が似ていることがわかります。また、洞爺湖は硫酸イオンの割合が他のイオン類より高いことが解ります。このようにトリリニアダイアグラムを描くことにより視覚的に湖沼のイオン構成割合の類似性がわかります。

(2) クロロフィル a 濃度

ワカサギの餌として重要な動物プランクトンは、湖沼で生産されている植物プランクトンと関連があります。植物プランクトンは光合成で有機物を作っています。その有機物は食物連鎖網に乗り動物プランクトン、魚類へと移ってきます。クロロフィル a 濃度は、この植物プランクトン量を推定する一つの指標となります。

クロロフィル a 濃度は 20 μm 以下 (<20 μm)、20 μm 以上 (>20 μm) に分けて測定をしました。なぜこのようにサイズ分けしたかといいますと、過去の調査から、<20 μm のサイズの基礎生産と漁獲量がある程度、正の関係があることが解っているからです。このことについては次の基礎生産量のところで説明します。図 15 に総クロロフィル a 濃度の変動を示しました。クロロフィル a 濃度は、植物プランクトンが存在すれば数値が出てきますので、必ずしも光合成をしているとは限りません。

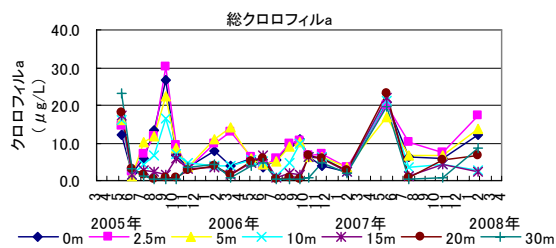


図 15 総クロロフィル a 濃度

2005 年の秋、2007 年の春に高い数値を示しているのがわかります。植物プランクトンのブルームがおきていると考えられます。これをサイズ別にグラフにしたのが図 16 です。総クロロフィル a 量と >20 μm のクロロフィル a 量の変動が似ていることがわかります。<20 μm のサイズは 2007 年の春の大きなスパイク以外は大きな変動は認められませんでした。2005 年の秋、2007 年の春は、この結果からはサイズ構成が異なっていることがわかり、2005 年の秋は >20 μm のサイズの割合が高く、2007 年の春では両サイズともに増えていることがわかります。これは植物プランクトン組成が異なっていることを示しています。

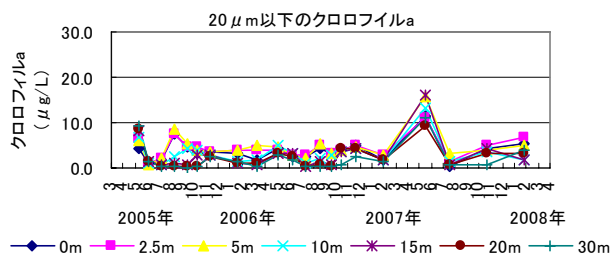
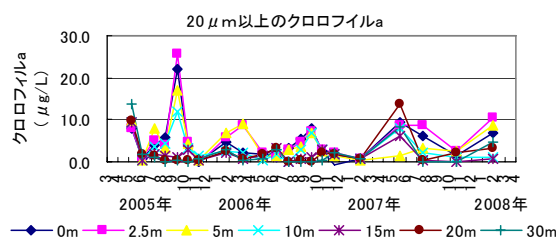


図 16 サイズ分けしたクロロフィル a 濃度

(3) 基礎生産量調査

湖沼の基礎生産量を図 17 に示しました。基礎生産量は、植物プランクトンが光合成で作る有機物の量を炭素量 (C) であらわしたものです。阿寒湖の場合、日野ら*1 が過去からの数値をまとめたものがあり、それにわれわれが、2007 年に測定したものを載せました。2002 年から 2007 年までは基礎生産量の測定はありません。

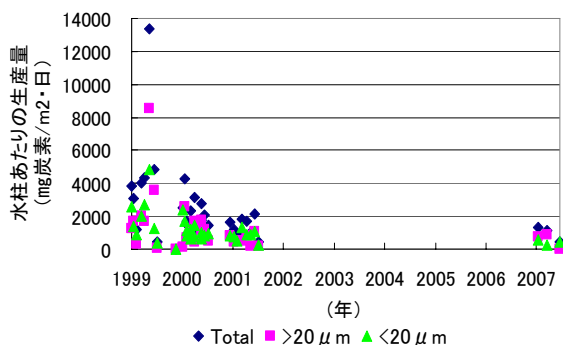


図 17 水柱あたりのサイズ別基礎生産量

図 17 はサイズを総量 (Total)、<20 μm に分けて計算しました。これは阿寒湖の 1m²あたりの底から表面まで、一日あたりに固定される (有機物になる) 炭素量を示したものです。2007 年の数値は特に従来から大きくかけ離れた数値ではないことが解ります。また、1999 年 9 月 13 日に 13.3 gC/m²・日の最大の生産量を示していますが、2007 年は生産量が低めに測定されています。次に、基礎生産量を、調査年別に阿寒湖全体で 1 日に固定される炭素の量として示したものが図 18 です。

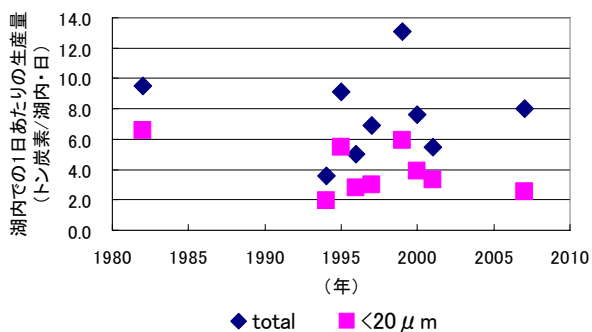


図 18 阿寒湖全体の一日内の基礎生産量 (年平均値)

ここでも総量は平年並みであるが、<20 μm のサイズの生産量が低めに測定されているのがわかります。

(4) 動物プランクトン調査

ここでは、底から表面まで NXX13 のプランクトンネット (口径 30cm) で採取し、ホルマリン固定したサンプルを 24 時間静置したときに沈殿する動物プランクトンの容積について説明します。魚の餌となるにはその魚にあった大きさが必要ですが、動物プランクトンは湖沼の基礎生産量に関連して量を増やしたりしていません。また、それを餌としている魚類などによっても量

は変化します。図 19 は動物プランクトンの沈殿量をグラフにしたものです。

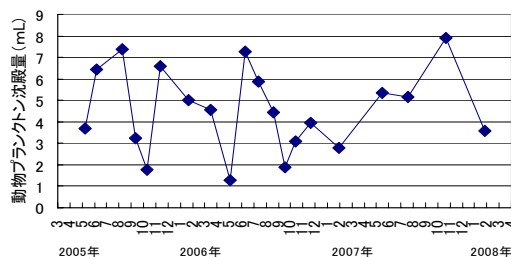


図 19 動物プランクトンの沈殿量

2005 年から 2008 年 1 月までの量を示しました。2007 年の 11 月に最大量 8mL を示しています。この時期は総基礎生産量が 2007 年 3 回の調査の中で最小値を示していた時期です。動物プランクトンの捕食により植物プランクトンによる生産量が少なくなっている可能性があります。

(5) 漁獲量調査

図 20 にワカサギの漁獲量変化を示しました。ワカサギの漁獲量は 1988 年に 93 トン取れていたものが、全体的に減少傾向にあり 2007 年では持ち直したといっても 59 トンでした。このような減少傾向の原因の一つに湖内への栄養塩の供給の減少したことが上げられています。それは、温泉地からの生活廃水を集中処理場経由で湖外に放水しているためと考えられています。

図 21 のワカサギ漁獲量と基礎生産量の関係では、統計的に有意ではないが、総量 (total) より<20 μm のサイズとの相関が高いことが解ります。大きなマークは 2007 年の 3 回の調査を年間 240 日の解氷期として年間の平均値を取ったものです。2007 年は、総量 (total) は平均的であるものの<20 μm のサイズの基礎生産が低い割に漁獲量があったことが解ります。しかし、基礎生産量測定回数が 3 回と少ないので、測定回数を増やすと、基礎生産量が変わってくる可能性があります。

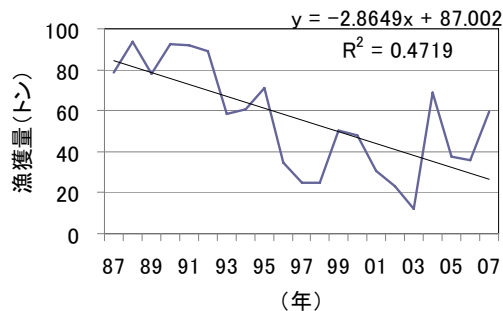


図 20 ワカサギの漁獲量の変化

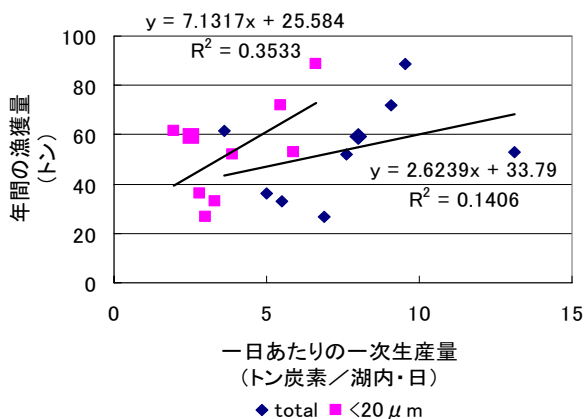


図 21 ワカサギの漁獲量と基礎生産量の関係
(日野ら作成データ*1 に 2007 年度分を加えたもの)

このように、1 年間の調査で初めて年間の生産量を出せますので、このグラフに総量 (total)、<20 μm にそれぞれ一つの点を加えることが出来るのです。

この結果からは、阿寒湖のワカサギの漁獲量は、1982 年から現在まで大きな変化は認められないので、湖内の基礎生産量とワカサギの漁獲量の関係を考えてゆくことは有効な方法と考えられます。

(6) 気象条件の把握

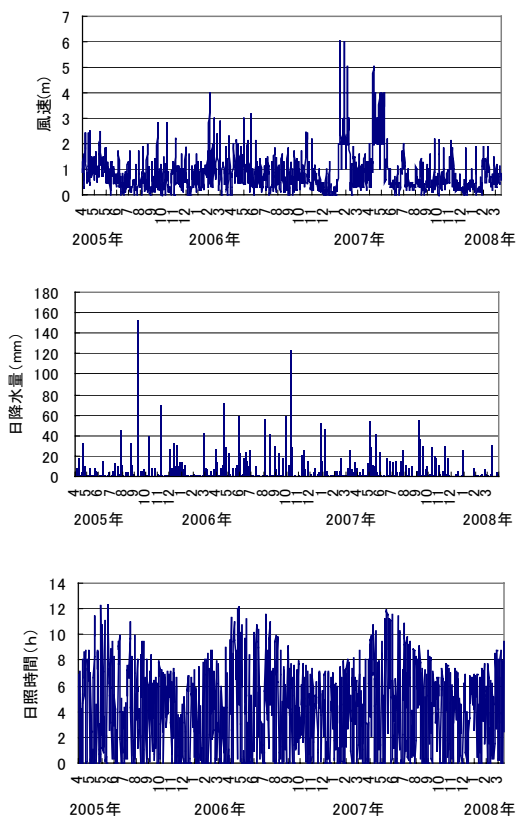


図 22 阿寒湖の風速、日降水量、日照時間の変化

風の影響で、栄養塩に富んだ底の水が上昇することにより、表層での生産量が上がる可能性が考えられます。2005 年から 2008 年までの降水量、風速、日照を気象庁のホームページのデータからグラフ (図 22) を作成しました。風速については 2007 年の 2 月、5 月にピークが認められます。5 月は循環期に当たりますので、攪拌がおきやすく風で容易に、底の栄養塩が表層に上昇したと考えられます。

表 1 各年の平均降水量、日照時間、風速、気温

年	降水(mm)	日照(h)	風速(m)	気温(°C)
2005	3.32	4.22	0.72	11.55
2006	4.74	4.33	0.84	11.50
2007	3.67	4.63	0.96	11.08

また、日降水量は 2006 年の 10 月に高いピークが見られますが、日照時間については、このグラフからははっきりしません。そこで平均値を出してみました。湖の基礎生産は冬季にはほとんど行われていないことが過去の調査からわかっています。このため生産が行われていると考えられる 5 月から 11 月までの平均風速、平均日照、平均気温を表 1 に示しました。2007 年の特徴としては、日照時間が長く、風速が他の 2 年より高く、気温は低い傾向が認められました。また、2006 年は降水量が他の 2 年より多いことがわかりました。降水量は、湖に栄養塩を添加します。また、強風が循環期に起これば、湖水の上下攪拌が起こり底層の栄養塩を光合成の行われている有光層に供給します。日照は基礎生産量の増減に関係します。気温は水温の上昇に関連します。これらの現象は互いに関連しあって、湖の生産量を増減させていると考えられます。

まとめ

阿寒湖は、底層のリン、窒素の濃度が他の水深より高い傾向にありました。夏季から秋季にかけての表層では、植物プランクトンの増殖により、窒素欠乏、リンの濃度の低下状況が出現していました。各種イオン類については、時期により種類によりわずかな濃度の変動は見られますが、全体的には、濃度は安定していました。アルカリ度を含めたイオン類から、阿寒湖の特徴を見たところ、阿寒湖は、支笏湖とイオン組成の割合が類似し、ナトリウムとカリウム、マグネシウム、カルシウムイオンの割合は、倶多楽湖と類似し、硫酸イオンと塩素イオン、炭酸イオンの割合が洞爺湖と倶多楽湖の間くらいにあることが解りました。

植物プランクトンのクロロフィル a 濃度は、おおむ

ね春と秋の循環期に濃度が高くなる傾向を示していました。底からの栄養塩を利用して、この時期に植物プランクトンの増殖が活発になっていると解釈できます。サイズで見ると、2007年の春先は<20μmのサイズが、2005年からの3年間で最大の濃度を示しています。>20μmのサイズも2番目に高くなっているのがわかりました。

基礎生産量は、過去の調査結果と比較すると、総生産量 (total) の数値は平均的な数値で、<20μmはやや低い値を示していましたが、特に従来から大きく異なる値ではありませんでした。

ワカサギ漁獲量は減少傾向にありますが、2007年の漁獲量は、近年では高く59トンになりました。気象条件では2007年の春先、循環期に強い風が吹いていたことが確認され、日照が長く、気温が低い傾向からワカサギの生産量増加につながった可能性が考えられます。つまり、循環期に風が吹いたことから底からの栄養塩の供給が多くなったこと、日照時間、水温の低下などが基礎生産量の増加とワカサギの餌料生物の増加をもたらした、近年にない漁獲量をもたらしたと考えられます。このことは、2007年春の循環期にクロロフィルa濃度の増加として認められましたが、基礎生産量の測定からは、この現象を捉えることが出来ませんでした。基礎生産量は日照に影響を受けるので、測定頻度を上げることにより、高い基礎生産量となった時期を捉えることができた可能性があります。

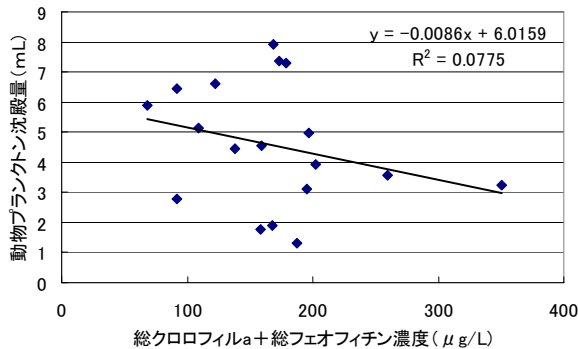


図 23 光合成色素と動物プランクトン量

図 23 にクロロフィルa+フェオフィチンと動物プランクトンとの関係を示しました。サイズは総量 (total) です。また、フェオフィチンはクロロフィルaの分解産物です。動物プランクトン量は「(4)動物プランクトン調査」の項目で説明したとおり、NXX13 ネットで底から表面まで曳いて採れたプランクトンをホルマリン固定したものを24時間静置したときの沈殿量です。調査結果からは有意な相関は認められないものの、動物

プランクトンが多いときは植物プランクトンが少なくなっていると考えられるところも見られました。このことは、植物プランクトンの生産量に動物プランクトンが依存していることを考えれば当然のことでしょうが、この調査からは傾向しかわからなく、量的な関係を明らかにするまでには至りませんでした。この調査では、プランクトンの種組成も調べており、これも含めて解析を行っています。

以上が現在まで行われた、阿寒湖の調査概要と現状です。水産孵化場では、漁業が行われている湖沼の湖沼環境変化、漁場環境を把握し、悪化した場合の改善策を考えるために、漁業協同組合の協力のもとこのような調査をしています。現在、洞爺湖、倶多楽湖、天塩パンケ沼で行っていますが、阿寒湖ほどのデータは集積していないのが現状です。いずれの調査も、環境の変化とそれに付随する問題が起きる前にその問題の予測に役に立つ調査を計画し、継続していくことが必要と考えています。

謝辞

稿をおえるにあたって、貴重なデータ、助言をいただきました山形大学の准教授日野修次氏、北海道環境科学研究センター石川靖氏、北海道栽培漁業振興公社技術顧問今田和史氏に深謝いたします。

参考文献

*1 山形大学理学部、北海道環境科学研究センター、北海道立衛生研究所、阿寒湖漁業協同組合、「阿寒湖の基礎生産環境と魚類餌料としての微生物の生産に関する研究報告書」、平成11年～13年 阿寒町受託研究。

(やすとみ りょうへい
: 内水面資源部水域環境科長)