

湖沼生態系の空間情報の取得と評価

～面として阿寒湖の湖底を診る～

山田 浩之

要 旨

昨今の情報の高度化に伴い生態系の保全の場でも、点や線ではない面や3次元といった自然環境・生態系モニタリングが求められるようになった。陸域では、衛星リモートセンシングや航空写真を用いたモニタリングが主に用いられるが、水中では、水の濁りの影響を受けるため困難であった。最近では、水中のモニタリングを可能とする方法としてソナー（音波探知機）が用いられるようになり、陸域と同様に面的なデータを迅速に収集できるようになりつつある。ここでは、ソナーを用いた阿寒湖の調査例を紹介しながら、モニタリング結果からわかってきたことを述べた。そうしたモニタリングを継続して行うことで、マリモをはじめとした水中の生物の保全に活用できればと考えている。

1 水中モニタリングの課題

湖沼は湿地ではないと思われるかもしれないが、「ラムサール条約」（正式名：特に水鳥の生息地として国際的に重要な湿地に関する条約）での定義では、淡水湖沼も湿地に位置付けられている。湿原と同じくその不均一性（物理化学的環境、生物の分布が一樣ではない）のために、学者の研究を困難にしている場所でもある（ホーン・ゴールドマン 1999）。湖沼の特に沿岸帯は、水深（地形）と水中の光環境に特徴付けられた水生植物の分布に見られるように複雑であり、その複雑な生態系をより良く理解するためには、点や線としてよりも、面として捉えるほうが望ましい。

近年、GIS（地理情報システム）やGPSを含むGNSS（全地球航法衛星システム）の普及や、地図や衛星画像をはじめとする様々な情報の公開に伴い、生態系を空間的に捉えようとする動きがある。読者の方もインターネット上の地図や地形図、衛星画像、航空写真を閲覧する機会が増えているのではないだろうか。そのような対象を空間として捉えるという視点から、先の複雑な湖沼環境のモニタリングにも空間的な情報収集が求められている（例えば、高村ほか 2007、Mantzafleri *et al.* 2009、Pinto-Coelho *et al.* 2010）。

湖沼に限らず水中での生物調査と言えば、従来、ダイバーによる潜水調査や船上からの観察や水中カメラを用いた調査が行われてきたが、調査地は

点や線となり、面として捉えようとするコスト（作業量）の側面から多くの地点で調査することが難しい。最近では、低空で航空写真を取得できるロボットヘリコプターや、数十 cm という分解能の高いマルチスペクトルセンサーを搭載した衛星画像（例えば、WorldView-2 や 3）など、水中のモニタリングを可能とするツールやリモートセンシング技術が発展しつつあり大きな関心を寄せており、実際の水域の調査研究でも用いられつつある（例えば、Holmes *et al.* 2007）。しかし、その導入・運用コストが高価である、あるいはそのデータ処理や解析に高度な知識を要するなど運用上の問題がある。また、双方とも光学的センサーにより得られたデータであるため、濁った水域ではモニタリングできないという問題もある。

いっぽう、海域の調査では海底資源の発見や、水産資源のモニタリングにソナー（音波探知機）が用いられており、最近ではサイドスキャンソナーを用いた水中の生態系モニタリングも行われるようになってきている（例えば、Blondel and Sichi 2009, Shumchenia and King 2010, McGonigle *et al.* 2011）。詳しくは後述するが、ソナーは超音波を用いたセンサーであるため、先の問題であった水の濁りにも耐え得るという利点がある。

ここでは、阿寒湖で実施してきたソナーを用いた調査を例に、空間的な情報としてのデータの取得や評価方法を紹介しながら、それらの面の情報から見えてきた阿寒湖の自然について説明したい。

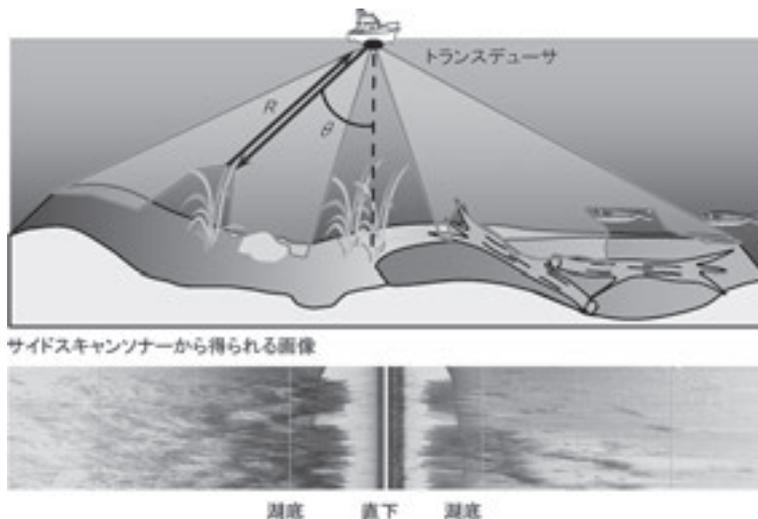


図1 サイドスキャンソナーの概要とそれより得られる後方散乱強度画像の見方。黒が濃いほど音波が強く戻っていることを示している。

2 ソナーについて

2.1 魚群探知機とソナー

ソナー (SONAR, SOund Navigation And Ranging の略) とは、音波を用いて水中の物体の探知、水深の測定 (測深) などを行う装置のことを言い、1910 年代より水産関連や測深などの様々な場面で活用されているリモートセンシング技術である (古澤 2001)。大きくはパッシブソナーとアクティブソナーに分けられ、パッシブソナーはエコーを受信するのみ、アクティブソナーは送波器から水中に超音波を放射し、対象物からの反射によって戻ってくるエコーを受波器で受信する仕組みをいう。後者はしばしば山彦にたとえられ、山に向かい「ヤッホー」と叫び、その音が戻るしくみと同じである (古澤 2001)。この音の行き来の時間を計ることで、音速とその時間から山までの距離を把握することができる。また、戻ってくる音の大きさ (強度) から、その山が岩肌が露出しているか、樹木で覆われているかなどという性質を把握できる。岩肌のほうが、音が反射し易く、戻る音の大きさが樹木で覆われた場所よりも大きいことは容易に想像できるだろう。このソナーの原理を用いたものとしてよく知られている魚群探知機 (魚探) がある。魚探は、垂直方向に発信、受信する音波を用いるビームソナーを応用したもので、魚群の検出に特化したものをいう。水中での音波の跳ね返る深さと強さ、形から魚群の存在を検出するものである。

2.2 生物・環境調査への活用

魚探に用いられているビームソナーは、魚類以

外の生物の例えば海草などの調査に活用されており、河口や海域での藻類の検出や分類、植生高や現存量の推定にも用いられている (例えば、Thomas *et al.* 1984, Sabol *et al.* 2002)。最近ではサイドスキャンソナーと呼ばれるソナーを用いて海草や底質の面的なモニタリングが行われるようになった (例えば、Lucieer 2008, Blondel and Sichi 2009)。サイドスキャンソナーとは、進行方向に対し垂直な方向へ扇形に広がる超音波を送信するソナーである (Blondel 2009)。対象物に当たり受波器に戻ってくる角度 (θ)、音波を放射して戻ってくる後方散乱波 (放射した方向と真逆方向に戻る音波) の時間から得られる距離 (R) と戻ってくる音波の強さである後方散乱強度から海底の画像を作成するものである (図 1)。その後方散乱強度 (放射した方向と真逆方向に戻る音波の強さ) は、底質の物性 (硬さ、粗さ) や形状によって変化する。例えば、砂地や岩がある場合、その音波源であるソナー方面には強く反射するが、その影となる部分では反射され難く、戻ってくる音波の強さは小さくなる。この音波の強弱の平面分布を濃淡で表現することにより、モノクロームの航空写真や X 線の胸部画像のような画像を得ることができる (図 1)。

一般に調査研究に用いられるソナーのシステムは、放射する超音波の周波数を変更できたり、超音波の放射をあらゆる方向に設定できたりするもので、数百万円から数千万円する非常に高価なものであったが、2009 年頃から数万円から数十万円程度の安価なサイドスキャンソナーを搭載したレジャー用魚探が市場に流通するようになった (例えば、LOWRANCE® HDS シリーズや Hummin-

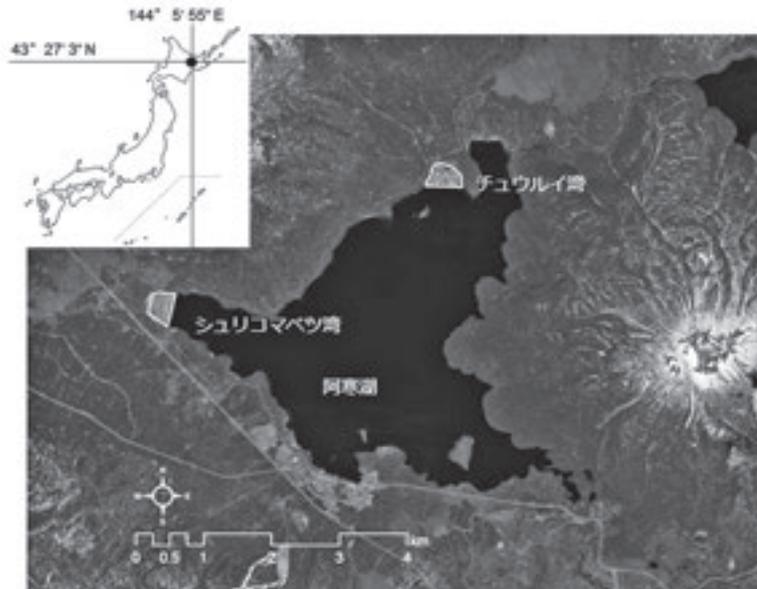


図2 阿寒湖の調査対象水域の位置図。白枠域は調査対象水域を示す。

bird®のSIシリーズ)。これにより、海洋だけでなく湖沼や河川での生物相や地形、底質など様々な調査に試用されはじめている（例えば、Kaeser and Litts 2010）。ここでは、そのレジュー用魚探が、モニタリングの用途に使用できるかどうかを検討した後、それをを用いて行った阿寒湖の生物・環境モニタリング事例を紹介したい。

3 阿寒湖の抱える問題とモニタリングの必要性

モニタリングの対象とした阿寒湖は、北海道東部（湖心：北緯 43°27′、東経 144°6′）の阿寒カルデラの西側に形成された堰止め湖であり、面積 13.0 km²、平均水深 17 m、最大水深 45 m の富栄養湖である。集水域はカルデラの北部および西部を含んで 161.3 km² に及んでいる（阿寒湖のマリモ保全対策検討委員会 2012）。2005 年 11 月には、マリモ (*Aegagropila linnaei*) をはじめとする希少な生物の生息地であることからラムサール条約の登録湿地となっている。

和名の由来の「毬藻」の通り（川上 1898）、マリモといえば球状のものを想像するだろうが、形態と生態は多様で、糸状あるいは房状の形態で岩石などの基質に付着するものから、糸状の集合体あるいはその断片が堆積、あるいは浮遊しているものなどがあり、若菜ほか（1999）はその様々な形態や生活型で存在するマリモを着生型・浮遊型・集合体と類型化した。よく知られているマリモは球状のものであるが、球状のものは集合型が真球に近い形状になった特別な形態のものである。つ

まり、糸状のもの、球状のものもマリモなのである。球状のマリモに限らなければ、北半球の高緯度地方の 200 を越える湖沼に存在していること（Boedeker *et al.* 2010）、国内では琵琶湖や富士五湖など 17 湖沼に存在していることが確認されている（阿寒湖のマリモ保全対策検討委員会 2012）。このようにマリモの分布は北半球の広範囲にわたるが、球状をなして群生している場所は、阿寒湖とミーヴァトン湖（アイスランド）に限られるとのことである（若菜 2013）。また、阿寒湖の場合、球状に生育する条件として、水深・光強度・マリモの流動のし易さ等の特殊な環境が挙げられている。これまでに盗掘や水質汚濁、水力発電所への給水のための阿寒湖水位の操作・調節などの様々な人間活動の影響を受けて、現在、球状のマリモが生息するのは阿寒湖内でもチュウレイ湾とキネタンベ湾の 2 か所に限られる（図 2）。1920 年代初頭までは、それらの湾以外に、シュリコマベツ湾や大崎の水域でもマリモが生息していたとのことであるが、シュリコマベツ湾では 1920 年代後半に上流域で行われた森林伐採と伐木の搬送に伴いマリモが土砂に埋没し、その生息域が壊滅状態となったとのことである。また、球状のマリモが生息する湾でさえも、富栄養化に伴いマリモ群生地にもツモなどの水生植物が侵入し増加することで、マリモの群生地が減少することが懸念されている（若菜 私信）。また、水生植物は、光合成量と呼吸量の釣り合う補償深度に対応して分布することがよく知られており、その補償深度には水深（地形）が強く関係する。残存するマリモの保全のためには、様々な人間活動の影響を取り除いてい



図3 レジャー用魚探の使用例。

く必要があるが、まずはマリモや水生植物そのものとそれらの分布を特徴付ける地形のモニタリングを要するだろう。

4 湖沼での調査例

海洋や河口で行われているソナーを用いた底質や地形の調査では、発射する音の強度や周波数、パルス長などの調整やあらゆる方向への音波発射を可能とする高精度で大型のソナーが用いられる。サイドスキャンソナーを搭載した機器のほとんどは、その音波を発射する装置（トランスデューサー）が、長さ1mを超えるロケット型をなしており、それを水中に沈め船で牽引して用いる。こうした調査方法は水深の大きい海洋では有効だが、水面まで水生植物が成長したり、流木が沈んでいたりする場所が多い湖沼での適用は至難の業である。これに対し、前述したレジャー用の魚探では、トランスデューサーの大きさが15~20cmと小型で、船体の底に設置するため、水中で牽引する必要も無く、先の障害の影響を受け難い。そのため、小型のボートやカヌーでも調査を行うことができる(図3)。それらの機器は、調査研究用と同じく、GPSやGNSS受信機を搭載しており、ソナーのデータとともに位置座標も記録できるため、事後のデータ解析も行える。

魚探を用いた調査の実際の作業は、魚探の音波の周波数等の設定値を現地に合わせて適切な値に設定した後、魚探を搭載したボートの調査ラインを対象とする水域の全域のデータを得られるように設定する。そして、サイドスキャンソナーのデータに歪みが生じないように直線にボートを航行させるという単純作業である。設定した調査ライン数によるが、0.2km²程度の水域では、約6時間で調査を完了することができる。

解析方法についての詳細は割愛するが、HumViewer (Johansen 2010) などの無料のソフ

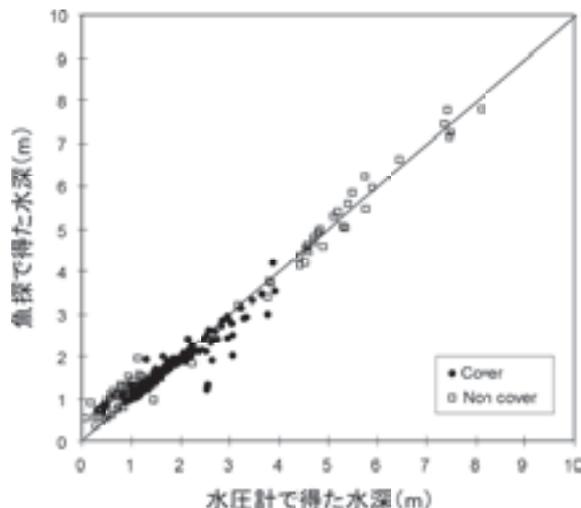


図4 魚探と水圧計で得た水深の比較。Coverは植生有、Non coverは植生無の地点を示す。

トウェアのほか、有償のSonarWiz (Chesapeake Technology, Inc.) 等ソフトウェアがあり、単純な作業で位置座標と水深のデータを表計算ソフトウェアで扱えるように変換して出力することや、サイドスキャンソナーで得られた湖底面の閲覧や画像を位置座標に合わせて合成することができる。

ソナーの調査で得られる結果は、音波の反射状況や強さであり、その結果からその音波の当たった対象が何かを推定するわけだが、不明な場合は、その対象が何かを確かめる必要がある。その現場で確認したデータをグランドトゥルースと呼ぶ。水中では潜水調査や水中カメラを用いた調査によりその確認が行われる。

5 魚探で作成した地形図から診た湖底環境

ここでは、レジャー用魚探のうち、Humminbirdの998cSI (Johnson Outdoors Marine Electronics, Inc.) を用いた調査結果を紹介する。この魚探を含め、レジャー用の魚探は、調査研究の用途で流通しているものではないため、どの程度の精度を有するのかもわかっていない。そこで、現地でのモニタリングに使用する前に、魚探内のビームソナーによって得られた水深の精度について調べた。水圧計を用いて得た水深を正しい値として、ビームソナーで得た水深と比較したものが図4である。正しい値との誤差を示す二乗平均平方根誤差 (RMSE) は0.29mであった。また、植生有りと無し (植被率10%以下) の地点をそれぞれ四角と丸の点で示しているが、植生被覆の有りの地点

a) チュウルイ湾



b) シュリコマベツ湾



図5 魚探で得た水深から作成した湖底の地形図。チュウルイ湾内の線は球状マリモ群生域を示す。標高は楕円体高(地球を楕円体と仮定した面からの高さ)である。調査時(2011年9月)の湖水面の楕円体高は約453 m。

では値がばらつき、過小に評価されていた。これは、魚探内のプログラムで植生面か湖底かを判別しているわけであるが、植生が密な場合、音の反射強度の現れ方が湖底と類似する場合があります、その植生面を湖底と判別しているためである。この他の測深の誤差要因として、波による水深の変化、風や流速、航行時や植物の光合成により生じる気泡によるノイズが挙げられる(Sabol *et al.* 2002)。この魚探のビームソナーによる水深の値の分解能は10 cmであり、元々高精度な結果が期待できるものではないが、30 cm程度の誤差があることと植生が密な場所のデータやノイズを含んだデータは解析の際に除くということに注意を要する。

マリモの生息域が壊滅した原因とその生息適地が残存しているかどうかを調べることを目的として、球状のマリモが壊滅したシュリコマベツ湾と、マリモの群生地のあるチュウルイ湾で測深調査を行った。15 m間隔で湾を横断するように魚探で水深データを得て、先に述べたノイズデータを除去した後、標高に換算したシュリコマベツ湾とチュウルイ湾の地形図を図5に示す。チュウルイ湾の地形図には2010年に水中カメラを用いて得たマリモの生息域を示している。かつての生息域は不明だが、現状として緩やかな平面ではなく、やや傾斜している場所に球状マリモが生息している。また、両湾の比較によって、シュリコマベツ湾のほうが緩やかな傾斜地の面が広く、湖底面の標高

が低いことがわかる。これは、シュリコマベツ湾のほうが水深の深い緩やかな面が広いことを示している。この地形図のみから断定することはできないが、シュリコマベツ湾では球状マリモの生息に適した遠浅な場(山本ほか2003)が失われていることが、球状マリモの群生地の壊滅した理由のひとつとして考えられる。

6 サイドスキャンソナーで診た湖底環境

前述したように、サイドスキャンソナーは音波の跳ね返り(反射)の強さを平面の画像として表示する機器である。魚探では、ビームソナーで得られる水深と同時に反射の強さのデータも記録できる。地形の調査と同じく、両湾の比較を目的として、2009年からシュリコマベツ湾とチュウルイ湾でサイドスキャンソナーを用いた湖底モニタリングを定期的に行っている。調査ラインごとに得られた帯状の画像を、同時に記録した位置情報で空間配置し合成することをモザイク化という。それによって作成したモザイク画像からテクスチャ特徴量(画像の模様やきめ)を用いて、植生や底質を自動分類して表示するという研究が、この研究分野の最近のトピックでもある(例えば、Lucieer 2008)。ここでは、その植生や底質の分類を行う前のモザイク画像の季節変化に注目して、各湾の湖底環境を診てみることにする。

図6にチュウルイ湾とシュリコマベツ湾のモザイク画像の季節間の変化を示した。この画像は、後方散乱波の強弱を256階調の濃淡(グレイスケール)で示したもので、ここでは戻る音波の強い場合を濃く(黒く)示している。湖底が砂や岩石の場合は、植物や堆積した有機物(枯死した植物や陸上由来の葉)に比べて反射し戻ってくる音波が強いことから、濃く示される。逆に言えば、音波を吸収し易いものがある場合は白く示される。チュウルイ湾の6月の画像をみると、湖心の方向から湖岸の右上に向けて、他の場所よりも濃い領域が広がっている。それは植物の被覆の少ない砂地の分布を示している。6月から8月にかけてその領域とその他の領域のコントラストが明確になり、白い部分や白と黒の混ざったざらざらとした模様の部分の面積が増加していることがわかる。これは夏季に向けて植物が成長している様子を示しており、チュウルイ湾の領域の約半分が、夏季には植物で覆われている様子が受け取れる。その植生域で水中カメラを用いて調査を行った結果、マツモ(*Ceratophyllum demersum*)・センニン

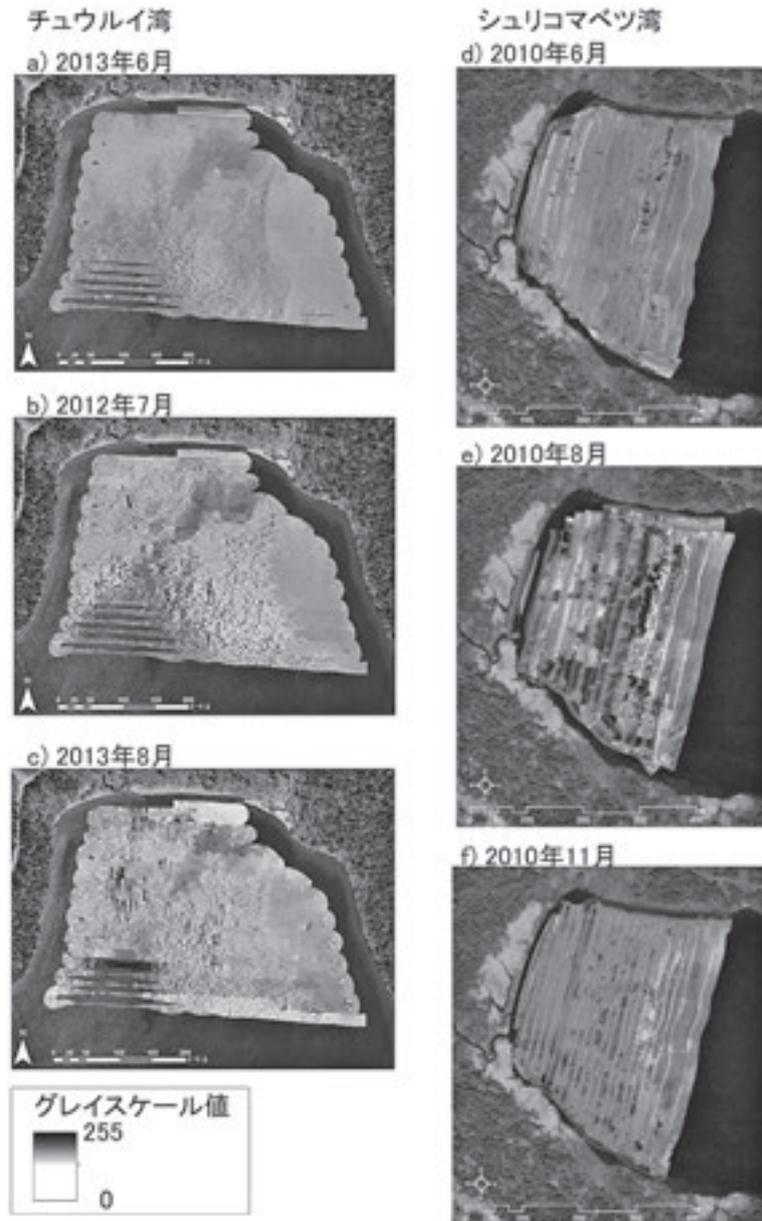


図6 魚探で得たチュウルイ湾とシュリコマベツ湾のモザイク化した後方散乱強度画像とその季節変化。

モ (*Potamogeton maackianus*)・エゾヤナギモ (*Potamogeton compressus*)・ヒロハノエビモ (*Potamogeton perfoliatus*) をはじめとする 20 種以上の水生植物が分布していること、その植生域のほとんどをマツモが占めており、そのマツモが 6 月から 7 月という他の植物よりも早い時期に成長していることが確認された (図 7)。

球状マリモの群生地は、砂地と同じように濃く示されるため、湾全体の濃淡の画像からは、砂地と区分し難い。図 6 のチュウルイ湾の 7 月画像の湾右上部分を拡大すると、斑紋の様子が現れ、数十 cm ほどの丸い物体が映し出されている (図 8)。これがマリモの画像であるが、砂地や砂地に岩石がある場所と似た模様であるため、かなり注

意深く見ないと認識することは難しい。このマリモの領域は右上の湖岸と先のマツモの領域に囲まれるように存在している。マリモの群生地では、球状のものが積み重なっており、下の湖底の砂地が現れ難いが、かつてあったマリモの打ち上げなどのようなイベントによりその密度が低下し、砂地が現れた場合には、マツモの成長は他の植物よりも早いため、その領域がマツモによって優占することも想定される。この数年のモニタリングでは、そうした様子は確認できなかったが、その点を注意して今後も継続的にモニタリングする必要があるだろう。

一方、球状マリモの群生地が壊滅してしまったシュリコマベツ湾の画像を見ると (図 6)、チュウ

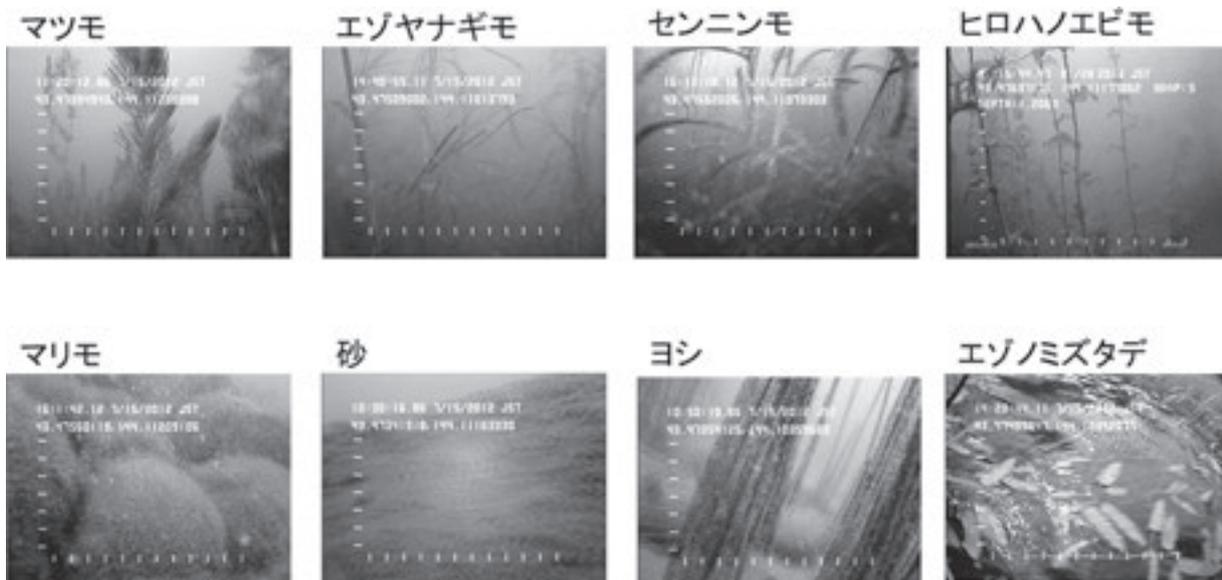


図7 水中カメラにより確認された水生植物と底質の一例。写真中の数値は撮影時刻と位置座標を示す。

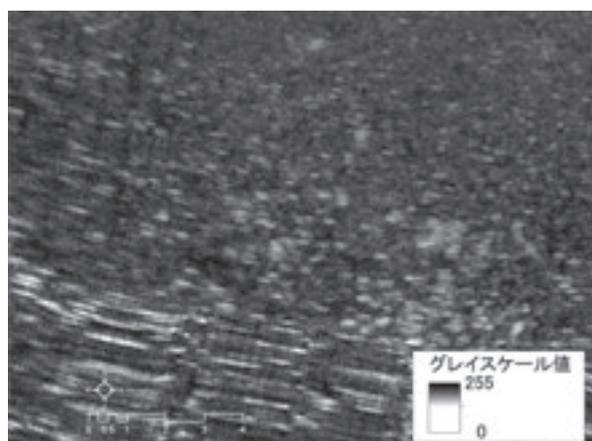


図8 球状マリモ群生地の後方散乱強度画像。

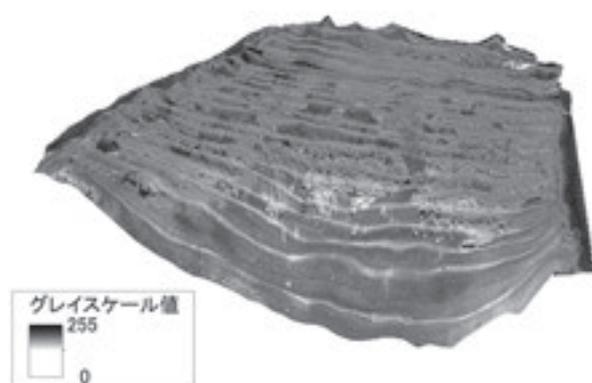


図9 オルソ補正（地形の凸凹の影響を補正）したシュリコマベツ湾の2010年11月における後方散乱強度画像。

ルイ湾と同様に植物の領域が6月から8月に向けて広がり、11月になると衰退する様子が把握できる。シュリコマベツ湾では、チュウレイ湾と異なり湖岸に近い浅い水域でクロモ (*Hydrilla verticillata*) が広く分布しているが、この他に出現する植物はマツモ・エゾヤナギモ・センニンモ等で、チュウレイ湾と同じくマツモの純群落が主であった。サイドスキャンソナーから得られた画像を地形図に重ね合わせると、それらの植物が水深の浅い緩やかな傾斜面全域を覆っていることがわかる(図9)。その植物はマツモをはじめとする多年性であることから、一旦定着すると湖底を大きく攪乱するようなイベントがない限り、再び砂地となることは難しい。シュリコマベツ湾でマリモが消失したきっかけは、前述した森林伐採による土砂流のためと考えられているが、その後再び生息適地として復元しないのは、チュウレイ湾で懸念さ

れたことと同じく、他の植物が優占し、マリモが生息できるような流動性がよい場が失われたためと推測される。

7 今後のモニタリングと保全活動へ向けて

これらの結果は、長期モニタリングの途中段階のものであるが、自然や人間活動による大規模な攪乱によってどこがどのように変化したのかを把握するための基礎的な材料となる。ここで紹介したように、研究用と比べて安価な魚探を使用して容易に調査が行えるようになりつつあるが、いざ調査となると、波浪などの天候に左右されたり、また長時間の船の運転により集中力が低下したりすることで、航路が歪みモニタリングに適したデータが取得できないこともある。ここで紹介し



図10 魚探の調査に使用したロボットボート。ボートは東京大学海津裕准教授より借用。

た結果の一部は、ルートを設定するのみで、自動航行するロボットボートを用いている(図10)。これにより航路の歪みの問題が改善し、航行速度も安定しているため、人間が行うよりも精度の高いデータを取得することが可能となった(Kaizu *et al.* 2011)。今後はそのようなロボット技術の発展により、モニタリングの省力化が期待できる。

ソナーの始まりは、タイタニック号の惨事の直後の1914年に開発された氷山探査機であるとのことである(古澤2001)。100年も前からある技術が、陸水の環境調査に活用され始めたのはここ最近の話である。また、ロボットボートだけでなく、近年のセンシング技術の発展は目覚しく、しかも速い。新しい手法、センサーなどのデバイスが次々と生まれるなか、環境モニタリングの実用化という面では対応がずいぶん遅れているように思えてならない。

しかし、そうした技術の進歩に対する実用化の遅れの話とは別に、モニタリングに関する実際の課題は、誰が継続して行うかということである。公共用水域のモニタリングは、大学の研究者ではなく、主に行政機関やその関連の研究所が行うことが主であるが、実際現場でモニタリングしているのは、その業務を請け負った民間の調査会社かもしれない。水質のモニタリングを例にすると、私たちの飲み水に関する評価法は、数々の公害問題を経験した結果、手法が確立されている。自然環境や生態系を対象とした場合のモニタリングの必要性が謳われてほんの四半世紀も経っていない。つまり、ソナーの環境調査への活用のように始まったばかりと言ってもよいだろう。私たち研究者に求められることは、様々な方法を用いて試行錯誤で行われている環境のモニタリングの事例がある程度でそろった段階で、生態系のモニタリング手法を体系化することが求められると思う。

一方で、結局モニタリングは、様々な場所での事例を集めて、場所の比較によってどんな状態が非健全かを明確にするか、ある地域を定期的に長期間監視し、時間軸の差分(時間変化)をみないとその意味をなさない。このレジャー用魚探を用いたモニタリングを始めた契機は、一般の方でも出来るモニタリングを目指したことにある。阿寒湖では地元の自然保護協会やボランティアの方をはじめとしてマリモを取り巻く自然の保護活動が活発に行われている。そうした活動の枠組みの中で、ここで紹介した面としての定期的な診断を継続して行い、いつ、どこを、どのように保全するかといった対策の具体化に活かすことができる流れができればと思っている。

謝辞

ここで紹介したデータを収集するにあたり、日本学術振興会(JSPS)科学研究費(23710039、24580378)、一般財団法人水源地環境センター(WEC)応用生態研究助成の助成を受けた。東京大学の海津裕准教授には、ロボットボートの開発や借用等で多大なる協力をいただいた。現地調査の際には、阿寒湖畔エコミュージアムセンターマリモ研究室の若菜勇博士、環境省阿寒湖自然保護官事務所や自然公園財団阿寒湖支部の職員の方々、北海道大学農学部・農学院農林環境情報学研究室の中西一洋氏、藤島洸氏、上谷祥利氏、横山諒氏に有意義なご助言ならびにご協力をいただいた。心より感謝申し上げます。

引用文献

- 阿寒湖のマリモ保全対策検討委員会(2012)マリモ保護管理計画。
- Blondel, P. (2009) *The Handbook of Sidescan Sonar*. Springer. 316pp.
- Blondel, P. and Sichi, O. G. (2009) Textural analyses of multibeam sonar imagery from Stanton Banks, Northern Ireland continental shelf. *Applied Acoustics*, 70, 1288-1297.
- Boedeker, C., Eggert, A., Immers, A. and Wakana, I. (2010) Biogeography of *Aegagropila linnaei* (Cladophorophyceae, Chlorophyta): a widespread freshwater alga with low effective dispersal potential shows a glacial imprint in its distribution. *Journal of Biogeography*, 37, 1491-1503.
- 古澤昌彦(2001)音で海を見る。パルソープックス007,成山堂書店。182 pp.
- Holmes, K. W., Van Niel, K. P., Kendrick, G. A. and Radford, B. (2007) Probabilistic large-area mapping of seagrass species distributions. *Aquatic Conservation Marine and Freshwater*

- Ecosystems, 17(4), 385-407.
- ホーン A. J.・ゴールドマン C. R (手塚泰彦訳) (1999) 陸水学. 京都大学学術出版会. 638 pp.
- Johansen, M. (2010) HumViewer - Viewer of Humminbird sonar recording files. [http://humviewer.cm-johansen.dk/\(2010.2 閲覧\)](http://humviewer.cm-johansen.dk/(2010.2%20閲覧)).
- Kaesler, A. J. and Litts, T. J. (2010) A Novel Technique for Mapping Habitat in Navigable Streams Using Low-cost Side Scan Sonar. *Fisheries*, 35(4), 163-174.
- Kaizu, Y., Iio, M, Yamada H. and Noguchi, N. (2011) Development of unmanned airboat for water-quality mapping. *Biosystems Engineering*, 109(4), 338-347.
- 川上瀧彌 (1898) 阿寒湖採藻記. 学芸会雑誌, 25, 45-48.
- Lucieer, V. L. (2008) Object-oriented classification of sidescan sonar data for mapping benthic marine habitats. *International journal of remote sensing*, 29(3), 905-921.
- Mantzafleri, N., Psilovikos, A., Blanta, A. (2009) Water quality monitoring and modeling in Lake Kastoria, using GIS. Assessment and management of pollution sources, *Water Resources Management*, 23(15), 3221-3254.
- McGonigle, C., Grabowski, J. H., Browna, C. J., Weber, T. C. and Quinn, R. (2011) Detection of deep water benthic macroalgae using image-based classification techniques on multibeam backscatter at Cashes Ledge, Gulf of Maine, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91, 87-101.
- Pinto-Coelho, R. M., Brighenti, L. S., Bezerra-Neto, J. F., Morais, C. A. and Gonzaga, A. V. (2010) Effects of sampling effort on the estimation of spatial gradients in a tropical reservoir impacted by an oil refinery. *Limnologica*, 40, 126-133.
- Sabol, B. M., Melton, R. E., Chamberlain, R., Doering, P. and Haurert K. (2002) Evaluation of a Digital Echo Sounder System for Detection of Submersed Aquatic Vegetation. *Estuaries*, 25(1), 133-141.
- Shumchenia, E. J. and King, J. W. (2010) Comparison of methods for integrating biological and physical data for marine habitat mapping and classification. *Continental Shelf Research* 30, 1717-1729.
- 高村典子・中川 恵・若菜 勇・五十嵐聖貴・辻 ねむ (2007) 達古武沼における水質特性および水質分布に影響する要因について. *陸水学雑誌*, 68, 81-96.
- Thomas, G. L., Marino, D. A., Thorne, R. E. and Pauley, G. B. (1984) An evaluation of fisheries sonar techniques as a tool for measuring aquatic macrophyte biomass, p.153-157. In *Proceedings 19th Annual Meeting, Aquatic Plant Control Research Program. Miscellaneous Paper A-85-4. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.*
- 若菜 勇・新井章吾・佐野 修 (1999) マリモの球化—構造と生成過程からみた球化現象の多様性. *遺伝*, 53(7), 45-52.
- 若菜 勇 (2013) 失われゆくマリモ—初めて確認された球状マリモ集団の崩壊と消失過程—. *ビオストーリー*, 19, 60-65.
- 山本省吾・若菜 勇・中瀬浩太・島谷 学 (2003) 阿寒湖チュウレイ湾におけるマリモの湖岸打ち寄せ・打ち上げ機構に関する考察. *土木学会海岸工学論文集*, 50, 611-615.

山田 浩之 (やまだ ひろゆき)

1973年生れ。北海道大学大学院農学研究院講師。岡山大学工学部土木工学科卒業、同大学院修士課程修了、北海道大学大学院農学研究院にて博士号取得後、京都大学防災研究所研究員を経て、2012年より現職。生態水文学・応用生態工学に関わる空間情報の取得・評価を専門とし、釧路湿原の自然再生に関する地下水工学的な研究などにも取り組む。