

課題名 D-0908 サロベツ湿原と稚咲内湖沼群をモデルにした湿原・湖沼生態系総合監視システムの構築

課題代表者名 富士田 裕子 (北海道大学北方生物圏フィールド科学センター)

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 65,435千円 (うち23年度 21,735千円)
予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) 稚咲内湖沼群の形成と環境・気候変動の影響解明 (北海道教育大学)
- (2) 植生・生物群集の特性解明とモニタリング指標生物群の特定 (北海道大学)
- (3) 湿原と湖沼群をめぐる水循環機構の解明・モデル化とモニタリング必要情報の抽出
(北海道大学、(独)農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所、(株)水エリサーチ)
- (4) リモートセンシング及びGIS技術を用いた湿原および湖沼生態系の総合監視システムの開発
((地独)北海道立総合研究機構、非営利特定活動法人EnVision環境保全事務所)

研究概要

1. はじめに (研究背景等)

我が国の多様な生態系の中でも淡水性の湿原や湖沼は、雨水、湧水、地下水、河川などの陸水を介して生態系が維持されるため、周辺部の土地利用等の人間活動の影響を特に受け易い特性を持っている。人間活動と調和しながら、この特異的な生態系の環境を良好な状態で維持していくためには、①湿原・湖沼生態系の形成過程の解明と気候・環境変動との関係解明、②生態系の物理・化学的な環境要因とそこに生息・生育する生物との間の相互関係、生態系の維持・動態機構の解明、③人為的影響の評価、④さらにこれらの関係や変化を広域にわたりリアルタイムに監視するシステムの構築が必要である。これら①～④が満たされることによって、湿原や湖沼生態系の長期的、短期的な保護・保全計画の構築や、自然再生事業の立案と実施、あるいは不測の事態に対する迅速な対応などが可能となる。

そこで我々は、国立公園にも指定されている北海道北部のサロベツ湿原と、隣接する稚咲内砂丘林・砂丘間湿地と湖沼群をモデル地区として、湿原や湖沼を効率的かつ効果的に長期にモニタリングしていくための生態系総合監視システムの構築を目指そうと考えた。サロベツ湿原では、昭和30年代の国家開発プロジェクト開始時の総合調査以来、約50年間にわたる科学的データの蓄積があり、研究実施上、大きなメリットを有している。一方、サロベツ湿原に隣接する稚咲内砂丘林と砂丘間に点在する湿原および200あまりの湖沼については、我が国屈指の原生的自然を有しているが、詳細な調査データが少なく、一部の湖沼の水位低下や植生の変化などが指摘されている。サロベツ湿原、稚咲内湖沼群ともに、その中心部には良好に自然が維持されているが、周辺域の開発や土地利用の変化に起因する水文環境や植生の変化が各所で顕著になっており、早急な対策が必要である。そのため両者ともに平成17年1月に発足した上サロベツ自然再生協議会において再生対象地区に指定されている。

2. 研究開発目的

本研究は、低地の高層湿原として日本最大の面積をもつサロベツ湿原と、湿原に隣接する北方針葉樹からなる砂丘林と砂丘間湿地・湖沼群を対象に、湿原・湖沼生態系の構造解明、および人為的影響の実態把握と劣化のメカニズム解明を通じて、生態系の変化を広域的に監視するシステムを構築することを目的とする。

具体的な研究の目的・目標は、以下のようにまとめられる。

- 1) 砂丘列と砂丘間湿地、湖沼群の形成史を解明し、さらに過去の環境、気候変動に対してこれらの生態系がどのように応答・変化したのかを明らかにする。
- 2) 湿原、砂丘間湿地、湖沼群の植生、水生植物、底生動物組成を明らかにし、生物と水位や水質等の環境要因との関係を解析する。
- 3) 湿原と湖沼群の表層地下水の流動機構や、地表水-地下水の交流特性を踏まえた水収支・水循環機構の解明を目的として、環境同位体分析、流量分析、数値シミュレーションを行う。その情報を基にモニタリングに必要な水文情報を抽出する。また、周辺の土地利用が湿原および砂丘間湖沼群の水循環に及ぼす影響を解明し、その対応策を提示する
- 4) 1)から3)の成果を基に、リモートセンシング及びGIS技術を用い、湿原および砂丘林と砂丘間湖沼群の広域生態系監視システムを開発する。

3. 研究開発の方法

研究は上述の目的に応じた4つのサブテーマからなるが、各テーマ間の連携を促進し、結果の検証・補完をするため、稚咲内湖沼群内に共同調査地域を設けた（図1）。

（1）稚咲内湖沼群の形成と環境・気候変動の影響解明

1）砂丘形成過程の解明

露頭などで、特に砂層間の腐食土層に注目した地層堆積状況の調査を行った。

2）植生・生物群集の変遷過程解明

3湖沼において湖底堆積物のボーリングコアを採取した。採取したボーリングコアについて、年代測定、花粉分析、ユスリカ化石の分析等を実施した。

（2）植生・生物群集の特性解明とモニタリング指標生物群の特定

1）現存植生の把握と、湖沼水位の低下が植生に及ぼす影響の解明

稚咲内砂丘間湿地・湖沼群からえた181の植生資料を用いて群落区分を行い、さらにそれらの群落を規定する要因を検討した。また、湿地・湖沼群の水位低下が植生に与える影響を評価するため、近年、開放水面積の減少が著しい3湖沼と、開放水面積の変化が少ない3湖沼における植物種の被度と冠水期間の関係を調べた。

2）水生生物群集の構造と立地環境との関係解明

稚咲内砂丘間湖沼群から、底質、地形、植生の異なる11湖沼を選び、湖心部と湖岸部で底泥試料の採取、底質や水質の調査を行った。データ解析では、湖心と湖岸の群集の相違や、湖沼ごとの群集の相違とその要因について検討した。

（3）湿原と湖沼群をめぐる水循環機構の解明・モデル化とモニタリング必要情報の抽出

1）流量観測による表層水の流動機構の解明とモデル化

主にレーザープロファイラー計測による数値標高モデルを用いて把握した、サロベツ湿原2流域と稚咲内砂丘帯5流域において流量観測を行い、各流域における流路を通じた流出量を評価した。

2）環境同位体による地下水・地表水交流特性の解明

稚咲内砂丘帯から宗谷丘陵に至る広域から、地表水（河川・湖沼水）、地下水（砂丘帯地下水と既設井戸）、降水を採取し、ラドン濃度、酸素・水素安定同位体比、無機イオン分析を行った。また砂丘帯を横断する測線を設け、地形測量、水位計測、透水係数測定、水温観測を行った。得られたデータより、砂丘間湖沼群の地下水流動系における位置づけを明らかにした。

3）シミュレーションモデルによる水循環機構の解明

稚咲内砂丘間湖沼群の水収支を、熱収支に基づく数値シミュレーションによって定量的に明らかにする方法を検討した。具体的には、MITモデルをベースにした熱移動多層モデルを構築し、気象庁AMeDASデータなどから得たデータを利用して境界条件を決定し、自記温度計によって実測した湖沼水温の垂直分布を再現した。

（4）リモートセンシング及びGIS技術を用いた湿原および湖沼生態系の総合監視システムの開発

1）地下水位の年変動及び広域評価手法の検討

湿原における地下水位の低下・上昇などの傾向を経年的に評価する手法を提案するため、サロベツ湿原の30地点で計測した地下水位データより様々な指標値を算出し、その妥当性を検討した。

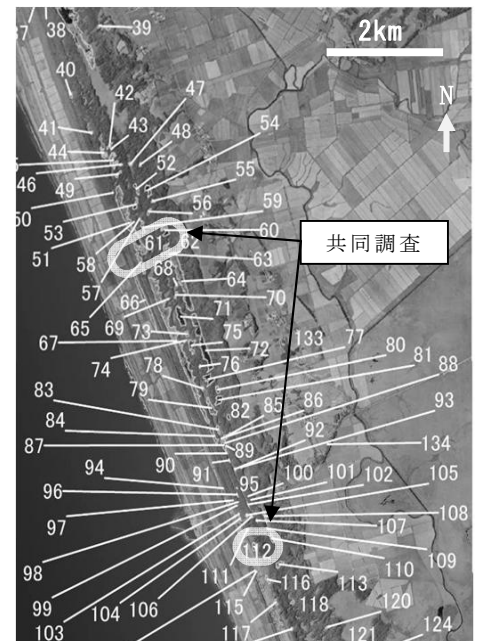


図1 稚咲内調査地位置図（全調査域のうち共同調査域を含む地域を抜粋したもの）：調査域内の全湖沼にNoをつけ便宜を図った。白枠が共同調査域（北側：原生的な環境を保持している地域、南側：農地等の影響が大きいと想定される地域）を示す。

2) 自動撮影装置による植生フェノロジーの把握手法の検討

展葉や落葉といった植生の季節変化を簡便に把握する方法として、地上定点カメラ画像（可視および近赤外域画像）の活用法を検討した。得られた画像から、NDVI（（近赤外－赤）／（近赤外＋赤））、GRVI（（緑－赤）／（緑＋赤））、2G-RB（2×緑－（赤＋青））を求め、植生タイプごとの季節変化を調べた。

3) ササ前線の変動要因の解析と動態モニタリング手法の検討

リモートセンシングおよびGISによる環境因子の分布図を用いて、ササ前線の拡大要因を解析するとともに、UAV（ラジコンヘリ）を含めてスケールと方法の異なる手法を組み合わせたササ植生拡大モニタリング手法を検討した。

4) 高分解能衛星画像を用いた環境変動の推定手法の検討

最新の高分解能衛星画像（WorldView-2(可視-近赤外)）を用いて、ササ前線および地下水位変動に関わる適応解析を行い、植生および水環境変動の検出可能性について検討した。

5) 空中写真を用いた湖沼水位の経年変化の推測と変化要因の検討

稚咲内砂丘間湖沼群の長期的な水位変化傾向を把握するため、4年代の空中写真を用いて開放水面の面積を判読するとともに、いくつかの湖沼において湖底から湖岸に至る横断地形測量を行った。それらの結果を基に、湖沼水位の変化を推定した。さらに、湖沼の形状や土地利用変化が湖沼水位の変化に及ぼす影響を検討した。

4. 結果及び考察

(1) 稚咲内湖沼群の形成と環境・気候変動の影響解明

1) 砂丘形成過程

砂丘堆積物の基底と挟在する腐食土層の年代測定結果、および既存資料から、この地域における砂の堆積は約 6000cal yr BP(暦年較正年代)に始まり、その後間欠的に休止期・形成期をはさんで現在に至ることが明らかとなった。堤間湿地堆積物(泥炭層)および湖沼の堆積物(骸泥)の堆積開始は、約 3600cal yr BPが最も古く、形成開始期に系統性はなかった。このことは、同一の砂丘帯に属していても湖沼の堆積や湿地堆積物の堆積開始が、ほぼ同時に、あるいは内陸側から順次堆積を開始したわけではないことを示していた。各地点における湖沼または湿原の成立は、それぞれの地点で適切な条件が整った(地下水位が上昇し過湿となった)時点を示していると考えられた。

2) 植生・生物群集の変遷

3地点で行った花粉分析の結果から、大局的には内陸側から順次森林が形成されてきたことが明らかとなった。最も内陸側の地点では、約 3300cal yr BPよりコナラ属が増加しはじめ約 2500cal yr BPにはコナラ属が優占する森林となり、約 1200cal yr BPからモミ属が増加していた。その他の2地点においてもコナラ属の増加、コナラ属の優占、モミ属の増加という変化が認められたが、その時期は各地点で異なり、コナラ属の増加は内陸側から順次進行し、コナラ属の増加から優占するまでに要した期間は海岸よりの地点で最も長かった。これは海岸近くの厳しい環境がコナラ属の森林(ミズナラ林)形成を阻害したためと考えられた。一方でトドマツ林の形成は、1200cal yr BPに始まり、海岸よりの地点でやや遅れたもののほぼ同時に始まっていた。この時期の北海道では各地で、モミ属やトウヒ属の増加が認められていることから、広域的な要因、即ち気候の寒冷化に起因する現象と考えられる。

ユスリカ組成の分析結果は、花粉分析の結果が一定の系統性を示すのとは対照的に、産出する分類群の共通性は高いが、それぞれの湖沼において優占するタクサや群集組成の変化の時期が異なり、独自の変化を示す特徴があった。このことは各湖沼の環境が、独自の変化を経てきたことを示唆している。ただし、約 2000~800cal yr BPのユスリカ属の減少は3湖沼で共通していた。この時期は湖沼堆積物の堆積速度が増加した時期とも概ね一致しており、何らかの共通の要因が関係している可能性があるが、今のところ不明である。

(2) 植生・生物群集の特性解明とモニタリング指標生物群の特定

1) 現存植生の把握と、湖沼水位の低下が植生に及ぼす影響の解明

稚咲内砂丘間湿地・湖沼群の現存植生として、湖沼植生7群落、湿原植生7群落の合計14群落を認め

た。除歪対応分析の結果、湖沼、湿原とも、群落を規定する最も重要な要因は水位であると考えられた。次いで水位変動の有無や栄養条件などが重要と推察されたが、より詳細な検討が必要である。開放水面面積が減少した湖沼では、湖沼水位の低下によって新たに生じた冠水しない立地において、浮葉植物や沈水植物が消失し、冠水する立地から冠水しない立地にまで広い範囲に生育する植物種がそこに分布し、両者がまじって生育することがなくなっていた。

2) 水生生物群集の構造と立地環境との関係解明

底生動物群集は、湖心部と湖岸部で異なっていること、多くの湖沼で湖岸部の方が種数・個体数が多いことが分かった。また各湖沼の湖心および湖岸の群集を集計して、湖沼単位で底生動物群集を見た場合、3つのグループに分けることができた。これらは、底質（砂質か有機質か）の違いや抽水植物の多寡、湖沼の形状や水質などによって分かれていると推察された。

(3) 湿原と湖沼群をめぐる水循環機構の解明・モデル化とモニタリング必要情報の抽出

1) 流量観測による表層水の流動機構の解明とモデル化

サロベツ湿原内の流路2か所で流量観測（2010年7～11月）を行った結果、期間全体の流出率（総流出高mm/総雨量333mm）は、29%と41%であった。降雨イベントごとにみると、地下水位が高いほど流出率が高くなる傾向がみられた。これは、表層に近いほど泥炭の透水係数が大きくなるため、地下水位が低い時の降雨は表層の泥炭層に保持されて流出しにくいからと考えられる。

稚咲内砂丘帯の5か所で流量観測を（2011年5～11月）を行った結果、期間全体の流出率は最小21%、最大43%であり、やや流域間のばらつきがあった。この流域間の違いは、流域面積や地形などが関係すると考えられた。

2) 環境同位体による地下水・地表水交流特性の解明

水素と酸素の安定同位体比より、稚咲内砂丘間湖沼は蒸発の影響を受けていること、蒸発の影響度合いは湖沼ごとに異なり（最小←平均→最大値は14.4←45.1→71.9%）、その度合いは湖沼の解放水面面積と水深によって概ね説明できることが示された。ただし、浮葉植物の被度が高いと蒸発を大きく妨げることが示唆された。

地下水のラドン濃度は平均0.6Bq/Lであったが、湖水からは検出されなかったことから、湖沼への地下水の流入はないかごく微量と推定された。また湖沼には河川水の流入も流出も見られないことから閉鎖性湖沼であり、地下水流動形においては地下水帯を涵養する位置にあるといえる。涵養型の湖沼であることは、同一地点に設けたストレーナー深度の異なる2つの観測井での水頭差から、下方への流動が示唆されたこととも整合する。また、水位回復試験で得られた透水係数は上位の泥炭層で 10^{-5} m/s程度、砂層で 10^{-4} m/s程度であったことから、湖水が比較的透水性の低い泥炭層を受け皿のようにして保持されていると推察された。

稚咲内砂丘帯地下水の横断形状をみると、東から西に向かう動水勾配（1/147）が認められた。これは南北方向の動水勾配より1桁大きかったことから、西側にある農用排水路の地下水位が砂丘列帯ならびに湖沼の水位に関係していることが明らかとなった。このことは、排水路の水質が、直近の砂丘帯地下水の水質に類似しており、砂丘帯の地下水が排水路へ流出していることが示唆されたことから支持された。

3) シミュレーションモデルによる水循環機構の解明

深度別の湖水温度実測結果をよく再現する熱収支計算結果がえられた。この結果をもとに、湖沼の水収支の時系列変化を定量的に明らかにすることが可能となった。4-10月の蒸発熱の総量（18,412cal/cm²）を蒸発熱（582.8cal/cm）で除して得られた316mmが、この期間の蒸発量で、期間降水量（775mm）に対して約40%という値が得られた。これは、上述の同位体を用いた推定に照らしても整合的な値といえる。

(4) リモートセンシング及びGIS技術を用いた湿原および湖沼生態系の総合監視システムの開発

1) 地下水位の年変動及び広域評価手法の検討

湿原の地下水位の中長期的なトレンドを検出する方法としては、地下水位測定値の代表値（平均値、最高値、最低値、変動幅）よりも、降水量変動を考慮した補正貯水量や比産出率（土壌空隙率）といった評価指標が有効であり、特に湿原中心部との差をとって相対変化を追跡する手法が最も有効であると考えられた。

2) 自動撮影装置による植生フェノロジーの把握手法の検討

定点カメラ画像から植生変化を表す指標としてNDVI (Normalized Difference Vegetation Index) と紅葉時期を示すとされるGRVI (Green and Red ratio Vegetation Index) を算出した結果、季節変化を捉えることができた。また、これらの値は植生ごとに異なっていた。したがって植生の変化や季節／経年変化をとらえるモニタリング方法として有効といえる。さらに各波長帯の分光輝度値と地下水位の相関を調べた結果、緩やかな関係性が認められ、カメラを用いた乾燥ストレスの検知可能性が示唆された。

3) ササ前線の変動要因の解析と動態モニタリング手法の検討

現地コドラートにおけるササ密度調査の結果、継続的に密度が増加していることが示された。UAV(ラジコンヘリ)撮影画像、空中写真及び衛星画像によるササ前線抽出結果は必ずしも一致しなかった。これはササ密度の違いに起因すると考えられることから、これらを統合的に解釈することで、ササの分布動態の予測に貢献すると考えられた。またササ前線の移動量と、地形・植生・水文・土壌に関する因子を重回帰分析にて評価した結果、湿地溝までの距離、標高、傾斜、表層土壌の炭素含有量との強い関係(重相関係数0.78、寄与率約60%)が示され、地形とそれに伴う水の動きがササ拡大に寄与していることを明らかにした。

4) 高分解能衛星画像を用いた環境変動の推定手法の検討

高分解能衛星WorldView-2画像に対する判別分析を用いた植生分類により、ササ前線の位置及び前線付近の植生分布が明瞭に抽出できることが明らかになったとともに、地下水位との関係分析から水ストレスと関係すると考えられる輝度値の動態が見出され、今後の生物多様性保全に向けた衛星リモートセンシングによる環境モニタリングへの有用性を示すことができた。

5) 空中写真を用いた湖沼水位の経年変化の推測と変化要因の検討

1947年から2009年までの4年代の空中写真から得られた、稚咲内湖沼群における湖沼の開放水面面積データと、地形測量結果と合わせて、過去約60年間の水位変動を推測した結果、水位変化のない湖沼と水位低下が顕著な湖沼が認められた。水位低下が顕著な湖沼の多くは、P/A値(湖沼開放水面の周囲長を面積で除した値)を指標とした周囲からの影響の受け易さが大きく、かつ1967年から2009年にかけての人工物への土地利用変化率が大きなエリアの近くにあることが明らかになった。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- ・ 稚咲内砂丘帯や湖沼群の形成過程が明らかになったことで、現在認められる生態系の数十年スケールの変化を長期的変遷(数千年スケール)の中に位置づけることが可能となった。これは気候変動による生態系への影響評価等に貢献する。
- ・ 生態系の基盤情報として、稚咲内砂丘間湿地・湖沼群の植生や底生動物群集が記載された。
- ・ これまでサロベツ湿原におけるササの拡大要因は水位低下であると考えられていたことに対し、広域的・面的なデータを用いて解析した結果、湿原内での地下水流動なども植生に大きな影響を与えていることを示した。
- ・ 水循環系の中での湿原や湖沼の位置づけを、降水、河川水、地下水、湖水に対する環境同位体等の水文学指標や流量・水位・水温観測結果をもとに明らかにした点、およびその研究アプローチを提示した点は意義が大きい。特に、これまでまったく不明であった稚咲内砂丘林間湿地・湖沼群の水循環において、流路からの流出率は小さく、湖沼群は地下水流入がないか極微量の涵養型閉鎖性湖沼であり、湖水は泥炭層を受け皿のようにして保持されていること、および湖水は時期によらず蒸発の影響を受けており、湖水への流入に対する蒸発の割合は湖沼の水深と開放水面面積との関係から概ね説明が可能である等、新しい知見が得られた学術的意義は大きい。
- ・ 砂丘列帯内の地下水流動は砂丘列帯を横断する方向へ卓越し、その動水勾配が湖水の下方浸透に影響することから、下流に位置する沿岸農地側の地下水管理が湖沼群の水文環境保全に重要であることが示唆された。
- ・ 湖沼水温の垂直分布を高い精度で再現する数値シミュレーションが開発された。ここで算出される蒸発熱を用いることで、複雑な気象観測等を行わずとも、より簡便な水温測定によって、湖沼からの蒸発散量の推定が可能となった。
- ・ 湿原水位の経年的な変化傾向を評価する手法が考案された。この手法によって、長期観測が特に必

要な事象（気候変動が湿原生態系に及ぼす影響など）の評価が可能となった。

- ・ 市販のデジタルカメラ画像から植生の季節変化を監視する方法が構築された。また、グランドベースから衛星に至る空間階層的な植生モニタリング手法が提示された。
- ・ 目撃情報を集積し分析することで、簡易にエゾシカの分布及び湿原利用の全体的な傾向を把握する手法が示された。

（２）環境政策への貢献

- ・ 砂丘林や湖沼群の形成の歴史を解明することは、現在の特異な地形や景観が形成されるに至った様々な歴史上の要因とその時間スケールを理解し、現在目にすることができる環境が内包している価値を評価する上で不可欠の情報である。
- ・ 稚咲内砂丘帯の植生や底生動物群集の現状記載は、管理計画の策定やモニタリング結果を評価する際の基盤情報となる。
- ・ サロベツ湿原域および稚咲内砂丘林帯湖沼群の水循環に関する基礎情報を上サロベツ自然再生協議会に提供した。
- ・ 観測孔での地下水位観測や酸素・水素安定同位体やラドンを用いたマルチトレーサー分析による水文特性調査の手法を提示し、沿岸湖沼群の水文環境変化のモニタリングに有効であることを示した。
- ・ 蒸発量の定量的推定法と推定値は、湖沼管理等の際の基盤情報となる。
- ・ 環境省の自然再生事業に対して、モニタリング手法を提示することができた。また、本研究によって開発された評価及びモニタリング手法は、汎用的技術として、サロベツ湿原のみならず、今後自然再生への取り組みが見込まれる他の湿原生態系の保全と修復に対しても、効果的な知見を提供することが期待される。
- ・ 稚咲内砂丘林の湖沼群について、重点的に監視すべき湖沼を示すことができた。今後、行政等で当該地域の空中写真を撮影した場合、変化量を推測する基礎となりえる。

6. 研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) 岡田操、井上京：湿地研究，1，3-16（2010）.
「泥炭の水理特性を反映した地下水流動モデル」
- 2) 岡田操：湿地研究，1，55-66（2010）
「サロベツ湿原の瞳沼とその形成過程」
- 3) Y. Fujimura, H. Fujita, M. Takada and T. Inoue: Landscape and Ecological Engineering, DOI 10.1007/s11355-011-0159-y（2011）
“Relationship between hydrology and vegetation change from *Sphagnum* lawns to vascular plant *Sasa* communities”
- 4) 土原健雄、吉本周平、石田聡、今泉眞之：農業農村工学会論文集，79(5)，339-348（2011）.
「環境同位体からみた沿岸湖沼群の閉鎖性の検討とその水文特性」
- 5) M. Takada, T. Inoue, Y. Mishima, H. Fujita, T. Hirano, and Y. Fujimura: Journal of Landscape Ecology,（2012）
“Geographical assessment of factors for *Sasa* expansion in the Sarobetsu Mire, Japan”（in press）
- 6) Y. Fujimura, M. Takada, H. Fujita and T. Inoue: Landscape and Ecological Engineering,（2012）
“Change in distribution of the vascular plant *Sasa palmata* in Sarobetsu Mire between 1977 and 2003”（in press）

（２）主な口頭発表（学会等）

- 1) 鈴木透、高田雅之：日本景観生態学会第21回大会（2011）
「湿原の景観構造が鳥類へ与える影響」
- 2) 高田雅之、井上京：水文・水資源学会2011年度研究発表会（2011）
「高層湿原における地下水位低下の評価方法」
- 3) 高田雅之、小熊宏之、井手玲子、丹羽忍：第3回日本湿地学会大会（2011）
「デジタルカメラによる湿原環境のモニタリング」
- 4) 武地遼平、井上京、高田雅之：第3回日本湿地学会大会（2011）

- 「サロベツ湿原における流路を通じた流出について」
- 5) 武地遼平、井上京、高田雅之：平成23年度農業農村工学会大会講演会（2011）
「平坦な泥炭湿地における流路を通じた流出」
- 6) 高田雅之、齋藤健一、三島啓雄、井上京：日本写真測量学会平成23年度秋季学術講演会（2011）
「多バンド高分解能衛星画像World View-2の湿原環境評価への適用可能性」
- 7) 紀藤典夫、阿部直美子、川上洋次郎：第22回ユスリカ研究集会（2011）
「北海道北部，長沼湖沼群における過去約3000年間のユスリカ群集の変遷」
- 8) 中畑研哉、紀藤典夫：日本第四紀学会2011年大会（2011）
「サロベツ原野稚咲内海岸砂丘列の植生形成史」
- 9) Y. Fujimura and H. Fujita: Joint Meeting of the 59th Annual Meeting of ESJ and the 5th EAFES International Congress（2012）
“Effects of water level fluctuation pattern on vegetation in sand dune mire complex”
- 10) 紀藤典夫、中畑研哉：日本生態学会第59回大会（2012）
「堆積物・花粉分析からみた砂丘林と湿原・湖沼群の形成史」
- 11) 吉本周平、土原健雄、石田聡、今泉眞之：日本生態学会第59回大会（2012）
「環境同位体分析による閉鎖性湖沼群の地表水・地下水交流特性の解明」
- 12) 高田雅之、立木靖之：日本生態学会第59回大会（2012）
「湿原・湖沼生態系のマルチスケールモニタリング方法」

7. 研究者略歴

課題代表者：富士田 裕子

1957年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了、理学博士
現在、北海道大学北方生物圏フィールド科学センター准教授

研究参画者

(1)：紀藤 典夫

1958年生まれ、北海道大学大学院理学研究科単位取得退学、理学博士
現在、北海道教育大学函館校教授

(2) 1)：富士田 裕子（同上）

2)：岩熊 敏夫

1947年生まれ、東京大学工学部・信州大学農学部卒、理学博士
現在、函館工業高等専門学校校長、北海道大学名誉教授

(3) 1)：井上 京

1960年生まれ、北海道大学大学院農学研究科修士課程修了、博士(農学)
現在、北海道大学大学院農学研究院准教授

2)：土原 健雄（平成21-22年度）

1975年生まれ、京都大学大学院農学研究科修士課程修了、博士(農学)
現在、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所主任研究員

3)：吉本 周平（平成23年度）

1981年生まれ、京都大学大学院農学研究科修士課程修了、博士(農学)
現在、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所研究員

4)：岡田 操

1949年生まれ、北海道大学工学部卒、博士(農学)
現在、株式会社水工リサーチ取締役

(4) 1)：高田 雅之

1958年生まれ、北海道大学大学院農学研究科博士課程修了、博士(農学)
現在、地方独立行政法人北海道立総合研究機構環境・地質研究本部環境科学研究センター
研究主幹

2)：立木 靖之

1975年生まれ、北海道大学大学院農学研究科博士課程修了、博士(農学)
現在、NPO法人 EnVision環境保全事務所研究員

D-0908 サロベツ湿原と稚咲内湖沼群をモデルにした湿原・湖沼生態系総合監視システムの構築

(1) 稚咲内湖沼群の形成と環境・気候変動の影響解明

北海道教育大学函館校

紀藤 典夫

平成21～23年度累計予算額：4,230千円

(うち、平成23年度予算額：1,430千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 稚咲内海岸砂丘列の形成期を明らかにするために砂丘堆積物中に挟在する古土壌の年代を測定し、また、植生変遷史、古環境を推定するために花粉分析とユスリカ分析を行った。その結果、砂丘の形成は約6000cal yr BPに始まり、その後間欠的に休止期・形成期をはさんで現在に至ることが明らかとなった。湖沼群の形成は、3600cal yr BPから始まるが、内陸側から順次進行したわけではない。花粉分析の結果、砂丘上の森林植生は、最も内陸側の地域 (Site C) では、3300cal yr BPに森林形成が始まり、順次海側へと前進した。トドマツ林の形成は1200cal yr BPに始まり、より海側の地点 (Site B) においてもあまり年代差がないことから、この地域の広域的な寒冷化と関係があると推論した。また、ユスリカ組成は、湖沼ごとに独自の組成変化を示すことから、個々の湖沼の独自の変化が影響していると推論した。

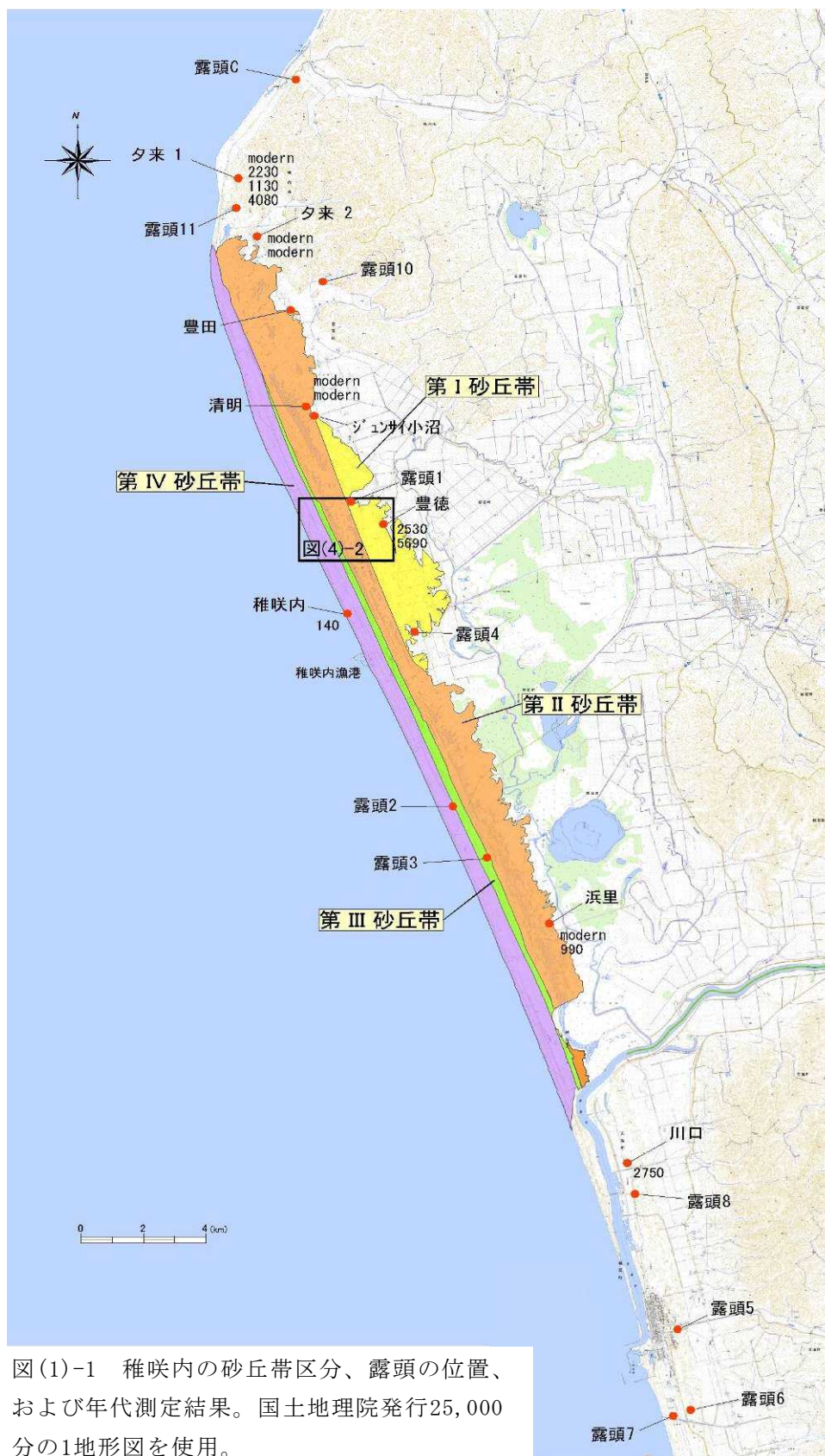
[キーワード] 花粉分析、ユスリカ化石、完新世、植生変遷、地形形成過程

1. はじめに

稚咲内湖沼群は、サロベツ湿原の西側に形成された砂丘帯とその砂丘間低地に形成された多数の湖沼群・湿原からなる。この地形は、水域と森林が美しいコントラストをなし、優れた景観を提供しているが、その成因については部分的にしか明らかにされていない。現在の湖沼群では、水位低下や植生の変化が指摘されているが、その原因が人為的要因によるものか、自然の経過の一断面を見ているのかについては明らかになっていない。本サブテーマでは、この湖沼群や植生の形成過程を明らかにし、自然史的な視点からの基礎データを提供するとともに現在の湖沼群の歴史的な位置を明らかにしようとするものである。

2. 研究開発目的

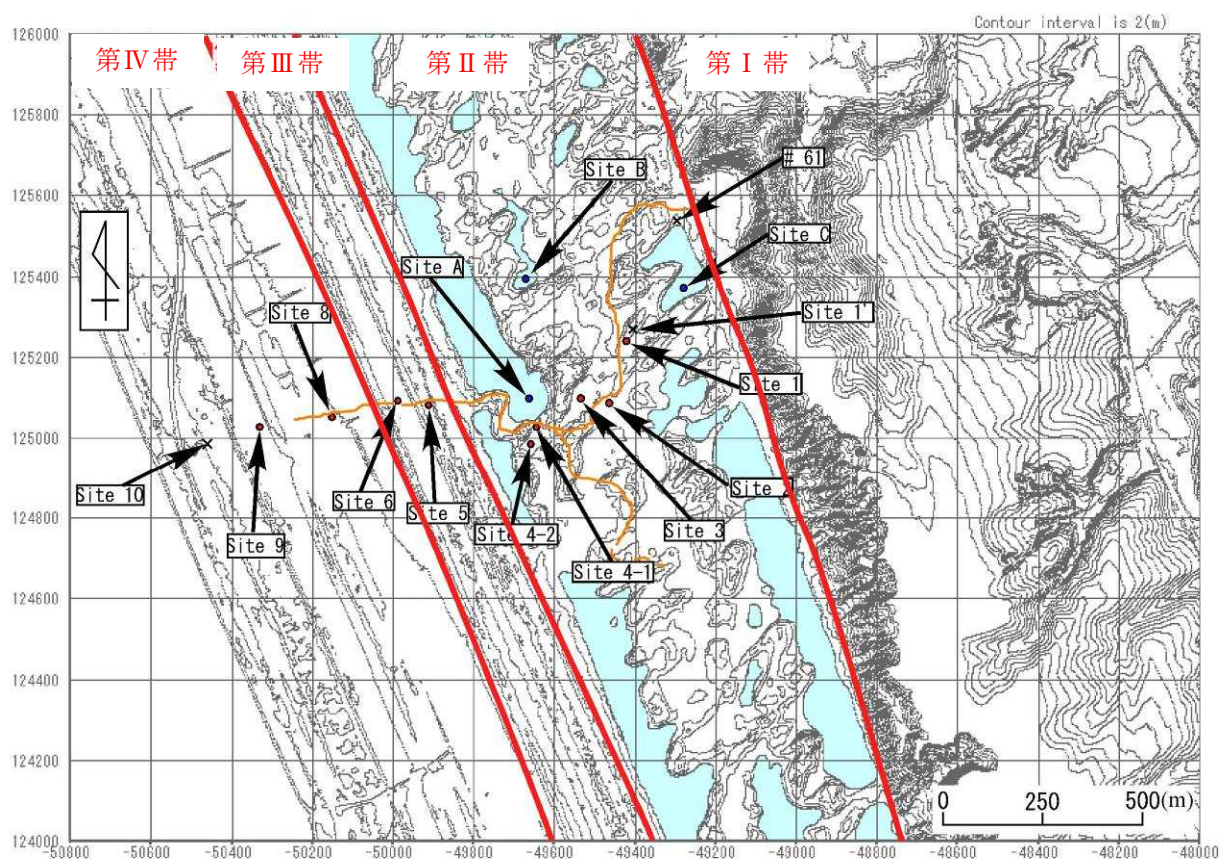
本サブテーマの目的は、稚咲内湖沼群および同地域の砂丘林の形成過程を解明することである。特に、これらの形成と完新世の気候の変化との関連を解明することに焦点を当てた。具体的には、本調査地域の特徴として挙げられる、発達した複数の砂丘列と、砂丘列間に形成された湖沼群、それら砂丘列・海岸に平行して成立している帯状の植生がどのような歴史を経て形成されたかを解明することを目的とした。



図(1)-1 稚咲内の砂丘帯区分、露頭の位置、および年代測定結果。国土地理院発行25,000分の1地形図を使用。

3. 研究開発方法

砂丘形成過程の解明については、野外調査により砂丘堆積物の断面を観察し、砂丘休止期に形成された腐植土層に着目して地層の堆積状況および地形を調査し、腐植土層を採取して、放射性炭素によるAMS(加速器質量分析法)年代測定を業者に委託して行った(図(1)-1)。植生および湖沼の形成史解明のため、稚咲内湖沼群の北部の3湖沼を選定し、業者に委託してボーリングコアを採取した(図(1)-2)。採取されたボーリングコアは、放射性炭素によるAMS年代測定を行い、花粉分析および予察的にユスリカ分析を実施して植生および湖沼の形成過程を考察した。過去の植生を解釈するための資料として、現在の植生と花粉組成の関係を検討するため、地表堆積物の試料も合わせて採取した。花粉分析は通常のコH-アセトリシス法により処理し、高木花粉の合計が500以上になるまでカウントして、全花粉胞子数を基数として百分率で示した。ユスリカ分析は、Hofmann(1986)の方法¹⁾に準じ、50個体を超えるまで拾い上げた。放射性炭素の年代測定数は、全部で39件である(表(1)-1)。年代の較正はIntCal10データベース²⁾を用い、OxCal v4.1 較正プログラム³⁾を使用した。また、測定年代の記述は本文中では便宜上、 1σ の中央値で示した(年代の較正範囲は、表(1)-1を参照)。



図(1)-2 試料採取地点および砂丘列区分。等高線(2m間隔)はレーザープロファイラーデータに基づく(岡田操氏作成)

表(1)-1 AMS¹⁴C年代測定結果

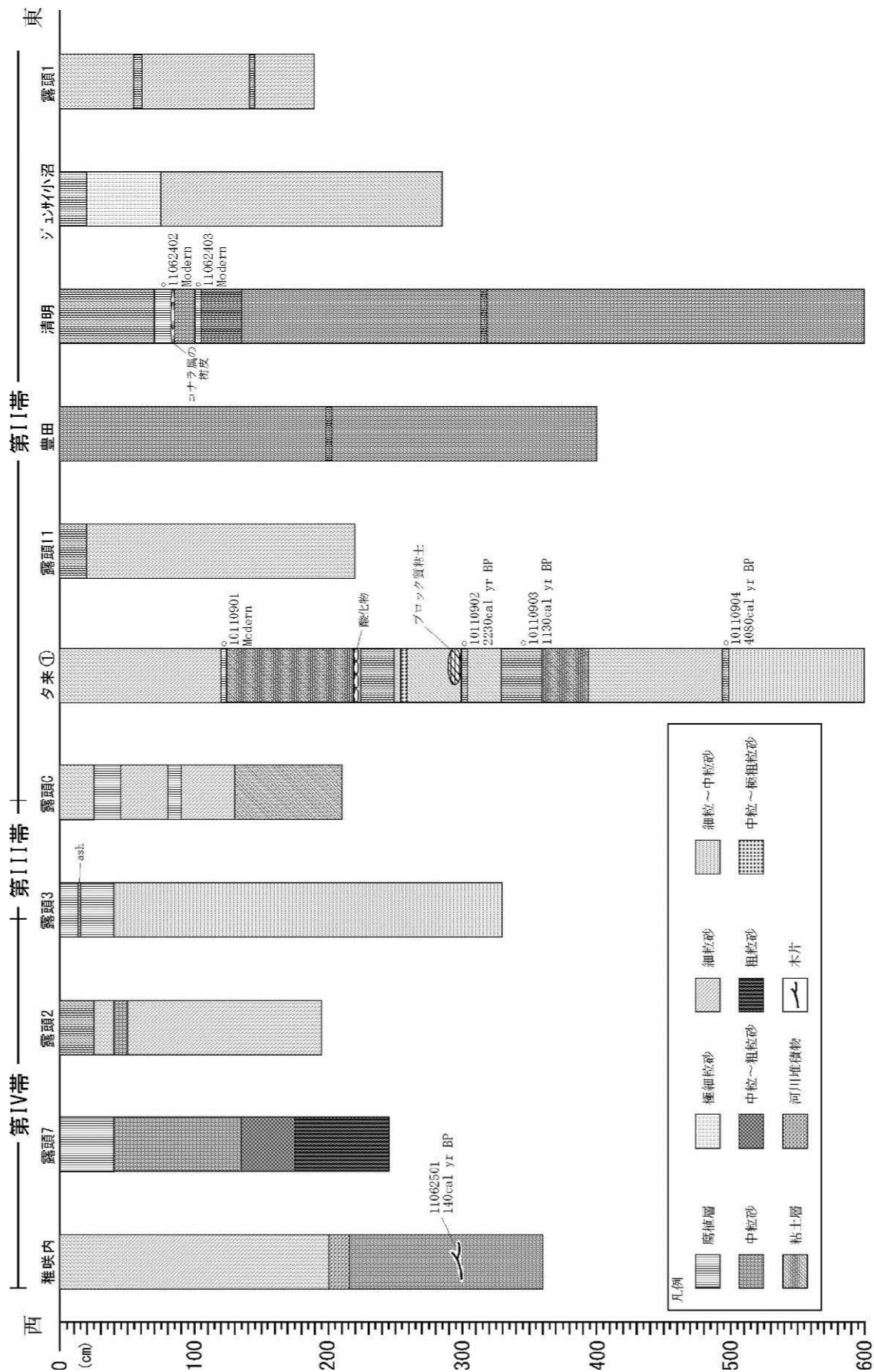
測定コード	採取場所	試料番号	深度 (cm)	Libby Age (yr BP)	$\sigma^{13}\text{C}(\text{‰})$	較正年代範囲 (1σ , cal yr BP)	較正年代 中央値 (cal yr BP)
IAAA-91874	Site A	①-38	37-38	760±30	-28.45±0.41	711-672	690
IAAA-91875	Site A	②-26	75-76	1340±30	-29.57±0.46	1299-1261	1280
IAAA-91876	Site A	③-15	114-115	1690±30	-26.66±0.69	1617-1548	1590
IAAA-91877	Site A	④-4	153-154	1850±30	-29.10±0.61	1821-1735	1780
IAAA-91878	Site A	④-43	192-193	2100±30	-24.67±0.49	2121-2040	2080
IAAA-91879	Site A	⑤-14	213-214	2450±30	-23.73±0.75	2503-2436	2470
IAAA-111525	Site B	①-18	17-18	550±20	-30.89±0.33	621-530	580
IAAA-91880	Site B	①-34	33-34	1180±30	-28.97±0.37	1144-1060	1100
IAAA-91881	Site B	②-19	68-69	1560±30	-30.02±0.54	1515-1457	1490
IAAA-91882	Site B	③-4	103-104	1880±30	-30.50±0.49	1874-1810	1840
IAAA-111526	Site B	③-30	129-130	2880±30	-30.36±0.82	3063-2958	3010
IAAA-91883	Site B	③-39	138-139	3380±30	-28.23±0.42	3644-3582	3610
IAAA-91884	Site C	①-42	41-42	1060±30	-29.70±0.41	977-931	960
IAAA-91885	Site C	②-33	82-83	1580±30	-32.18±0.48	1468-1416	1450
IAAA-91886	Site C	③-25	124-125	1990±30	-26.80±0.46	1954-1920	1940
IAAA-91887	Site C	④-17	166-167	2240±30	-28.65±0.57	2274-2154	2210
IAAA-91888	Site C	⑤-8	207-208	2590±30	-30.18±0.43	2755-2724	2740
IAAA-91889	Site C	⑤-49	248-249	3100±30	-28.95±0.69	3372-3321	3350
IAAA-91890	Site 1	②-13	61-62	1120±30	-30.33±0.47	1038-979	1010
IAAA-91891	Site 2	③-55	144-145	1870±30	-30.29±0.61	1835-1775	1810
IAAA-91892	Site 3	⑦-52	346-347	1710±30	-29.83±0.53	1627-1566	1600
IAAA-91893	Site 4-2	⑥-45	293-294	2060±30	-30.51±0.66	2061-1991	2030
IAAA-91894	Site 5	②-5	55-56	910±30	-30.97±0.47	905-855	890
IAAA-91895	Site 8	③-51	151-152	1700±30	-29.71±0.59	1622-1554	1590
IAAA-102807	ジュンサイ小沼	⑧-5	379-380	3070±30	-29.66±0.39	3346-3263	3300
IAAA-102800	夕来①	10110901	120-123	Modern	-26.63±0.43	-	-
IAAA-102801	夕来①	10110902	298-302	2200±30	-25.34±0.47	2307-2154	2230
IAAA-102802	夕来①	10110903	327-357	1200±30	-30.24±0.61	1171-1081	1130
IAAA-102803	夕来①	10110904	492-497	3740±30	-26.20±0.41	4149-4001	4080
IAAA-102798	夕来②	10062704	10-25	Modern	-26.47±0.56	-	-
IAAA-102799	夕来②	10062705	45-55	Modern	-29.04±0.37	-	-
IAAA-111519	清明	11062402	70-85	Modern	-26.84±0.43	-	-
IAAA-111520	清明	11062403	100-105	Modern	-27.04±0.44	-	-
IAAA-102796	豊徳	10062701	38-50	4960±30	-27.33±0.42	5721-5656	5690
IAAA-102797	豊徳	10062703	22-23	2460±30	-27.16±0.49	2698-2368	2530
IAAA-111522	稚咲内	11062501	294-295	130±20	-26.43±0.70	268-13	140
IAAA-102804	浜里	10111001	75-80	Modern	-26.58±0.52	-	-
IAAA-102805	浜里	10111002	145-165	1070±30	-27.66±0.60	1045-934	990
IAAA-102806	川口	10111003	80-95	2610±30	-25.01±0.43	2757-2737	2750

4. 結果及び考察

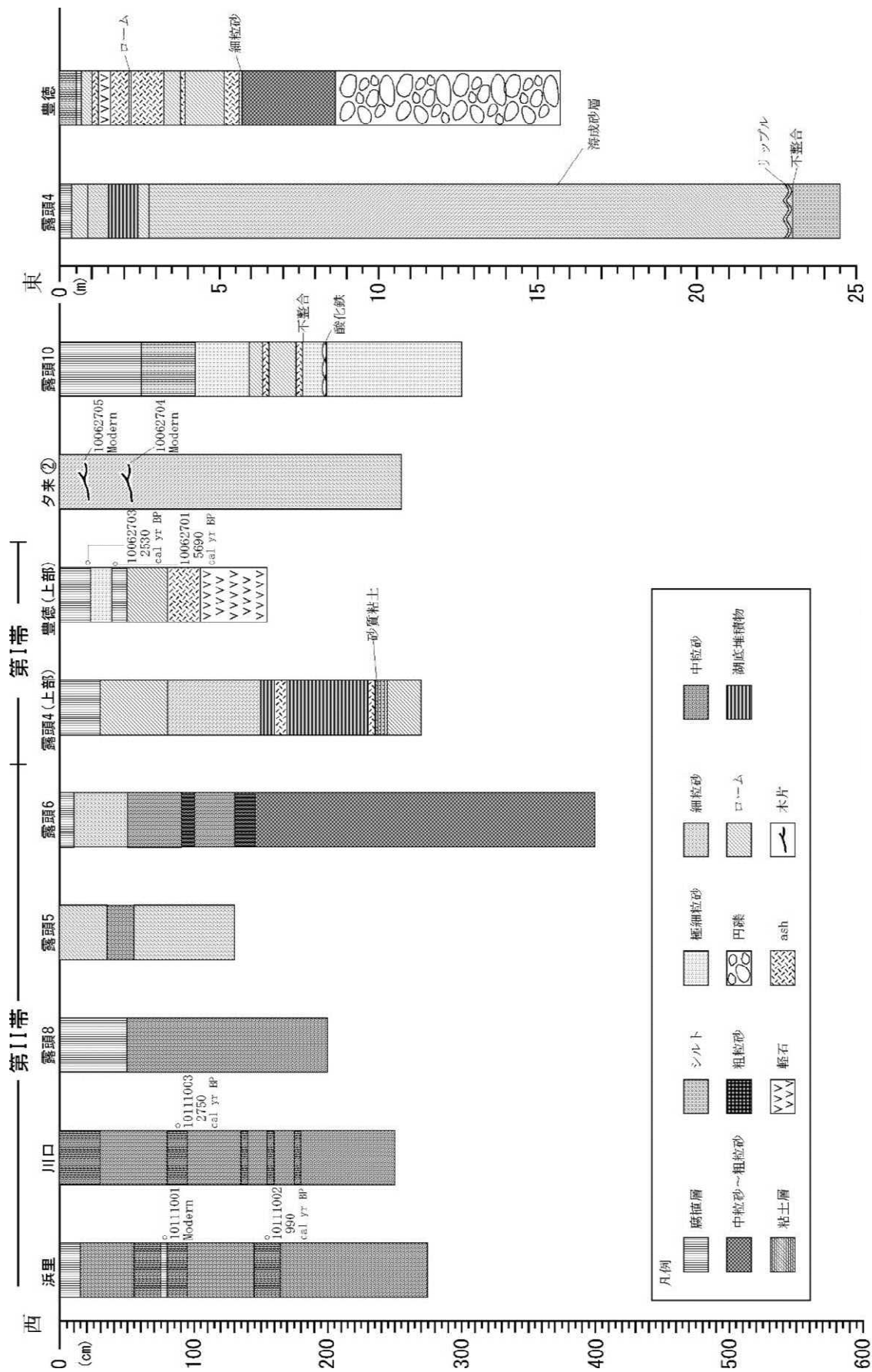
(1) 結果

1) 砂丘堆積物

野外調査の結果、この地域に形成された砂丘列を内陸側から第I～IV砂丘帯に区分した。この砂丘帯区分は、第I帯が成瀬ほか(1984)⁴⁾のI～IIIに相当し、第II帯は成瀬ほか(1984)⁴⁾のIV～VI、第III帯は成瀬ほか(1984)⁴⁾のVII～IXに相当する。それぞれの帯は、複数の小規模の砂丘列からなる。ほとんどの露頭において、表層20cm前後の砂を交えた腐植土層とその下位に数10cmあるいは数m以上の下限が不明の砂層が観察され、砂層中には腐食層を挟まない場合が多い。観察した露頭の柱状図および年代測定結果を図(1)-3、4に示した。



図(1)-3 露頭柱状図(1)
柱状図に、年代測定値とその試料番号を示す。



図(1)-4 霧頭柱状図(2)
柱状図に、年代測定値とその試料番号を示す。

砂丘堆積物中に腐植土層を挟在する露頭のうち、豊富町豊徳の最も内陸側に位置する砂丘堆積物の基底は、5688cal yr BP (1 σ の範囲の中央値；以下同様) で、砂層の直上の腐植土層の年代は2533cal yr BPであった。その他の地点からの年代測定結果から、約4100cal yr BP、2700cal yr BP、1000cal yr BP、および複数の地点から modern を示す年代が得られた。

ボーリングコアの試料の砂の含有量の分析 (図(1)-5) からは、Site Bにおいては約2300cal yr BPに砂の含有量が上昇する以外は、砂はほとんど検出されなかった。また、より海岸に近い地点 (Site 8；図(1)-2参照) のコアの分析では、1200~500cal yr BPに間欠的に砂の含有量が多くなることが明らかとなった。

第Ⅱ砂丘列帯の延長に露出する断面 (夕来2；図(1)-1参照) から、地表から深度約1mの層準の腐植土層は年代測定の結果、現世となった (図(1)-4)。また、稚咲内漁港の約3.6km北方の海食崖に露出する砂層 (稚咲内) に含まれる木材化石の年代は140cal yr BPであった (図(1)-3)。

2) 湖沼および堤間湿地堆積物

調査地域の3つの湖沼、Site A (湖沼#61、通称“メガネ沼”)、Site B (湖沼#59) およびSite C (湖沼#60、通称“コの字沼”) の水深の深い部分から水底堆積物を採取した。いずれの地点も、水深は1.3~2.5mである。採取された堆積物 (骸泥=ユッチャ；植物遺骸を主とする有機物) の厚さは、約1.5~2.5mで、最下層の砂の層に達して掘削不能となった。湖沼堆積物は、必ずしも内陸側の湖沼の堆積物の年代が古いとは限らなかった (図(1)-5)。骸泥の最下底の年代は、Site Bが最も古く3630cal yr BP、Site AとCは、それぞれ2530cal yr BP、3320cal yr BPであった。いずれのコアからも樽前aテフラ (肉眼では識別できない) と思われるテフラを検出した (Site A；深度19cm、Site B；8cm、Site C；11cm)。堆積物の平均の堆積速度は、Site Aが0.84mm/yr、Site Bが0.38mm/yr、Site Cが0.75mm/yrでSite Bが他の湖沼に比べて著しく堆積速度が遅い (図(1)-6)。いずれの湖沼も、堆積物の堆積開始期と最近約1000年間に堆積速度が遅い傾向があり、約2000~1000cal yr BPに堆積速度が最大になる。

調査地域の9地点 (Site 1~9；図(1)-2および5) において堤間湿地堆積物を調査した。堤間湿地堆積物は、海側ほど堆積物が薄くなる傾向があるが、かならずしもその傾向に合わない地点もある。

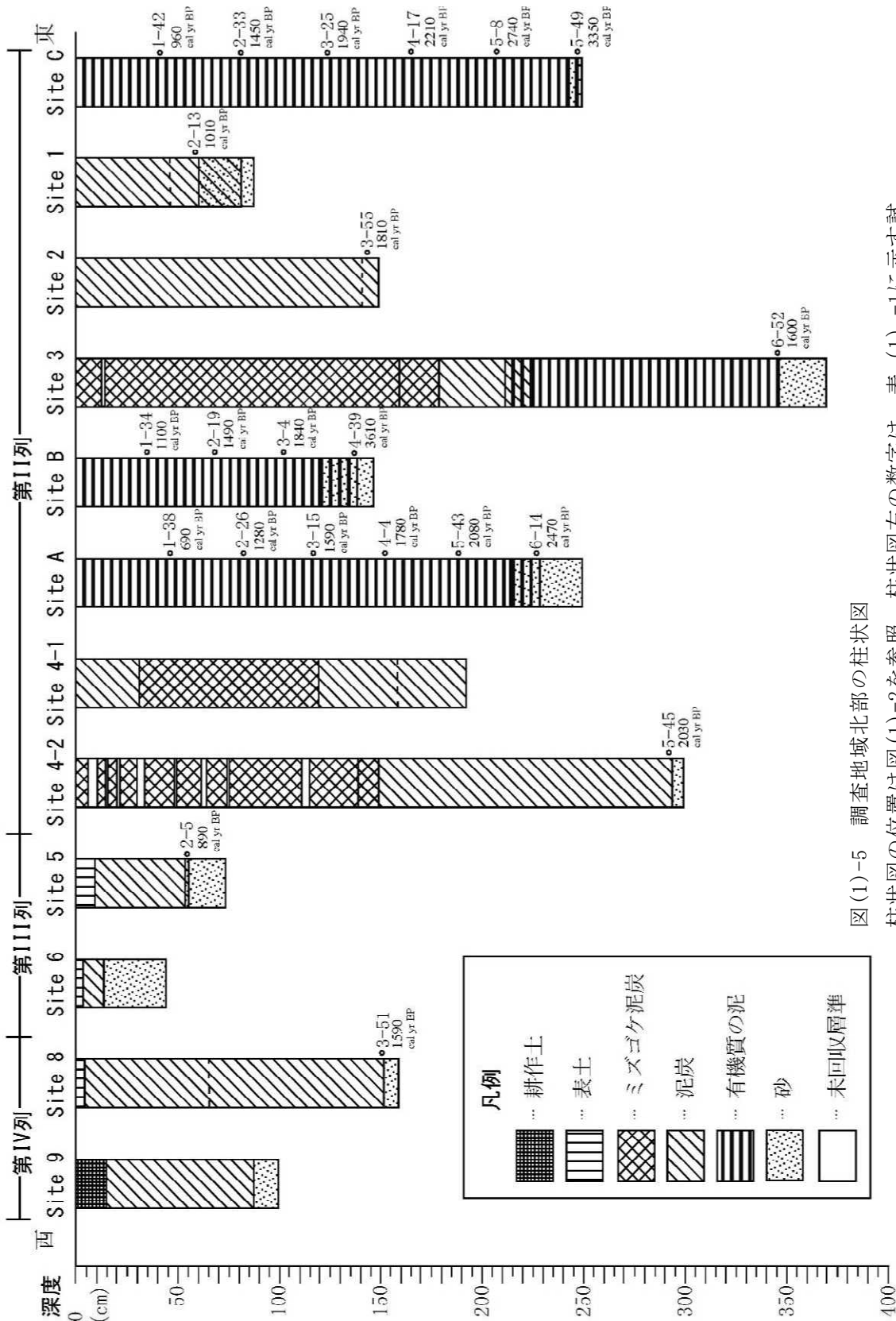
3) 花粉分析の結果 (図(1)-7~9)

Site Aの花粉分析の結果 (図(1)-7)、組成変化に基づいて下位よりⅠ~Ⅳの花粉帯に分帯した。木本花粉の割合は、上位に向かって継続的に増加を続け、最下位では約40%であるが最上位で80%に達する。コナラ属は、700cal yr BPにやや急激な増加を示し、モミ属は580cal yr BP以降増加して、300cal yr BP以降ほぼ現在の組成となる。

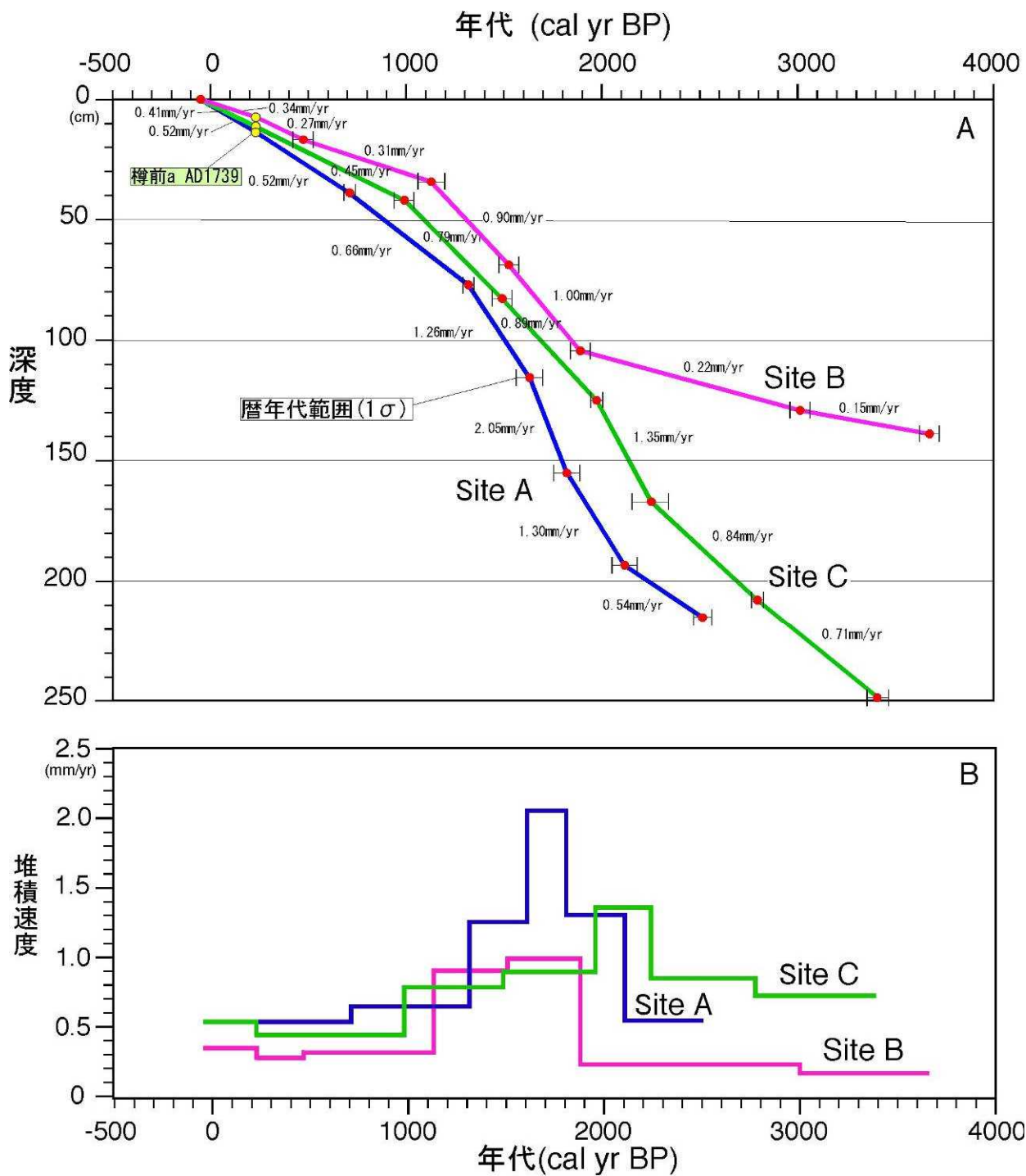
Site Bにおいては (図(1)-8)、2300cal yr BP以前は非樹木花粉・胞子の割合が70%前後で高い割合を占める。2300~1700cal yr BPはコナラ属花粉の割合が連続的に増加し、樹木花粉の割合が80%に達する。1700~1200cal yr BPはミズナラ林の安定期で、1100cal yr BPから連続的にモミ属花粉が増加して約400cal yr BPには現在の組成に達する。

Site Cにおいては (図(1)-9)、高木花粉組成は6つの花粉帯に分帯した。3300~3200cal yr BPは、花粉全体に占める高木花粉の割合が低く (約30%)、その後、コナラ属が増加して約2500cal yr

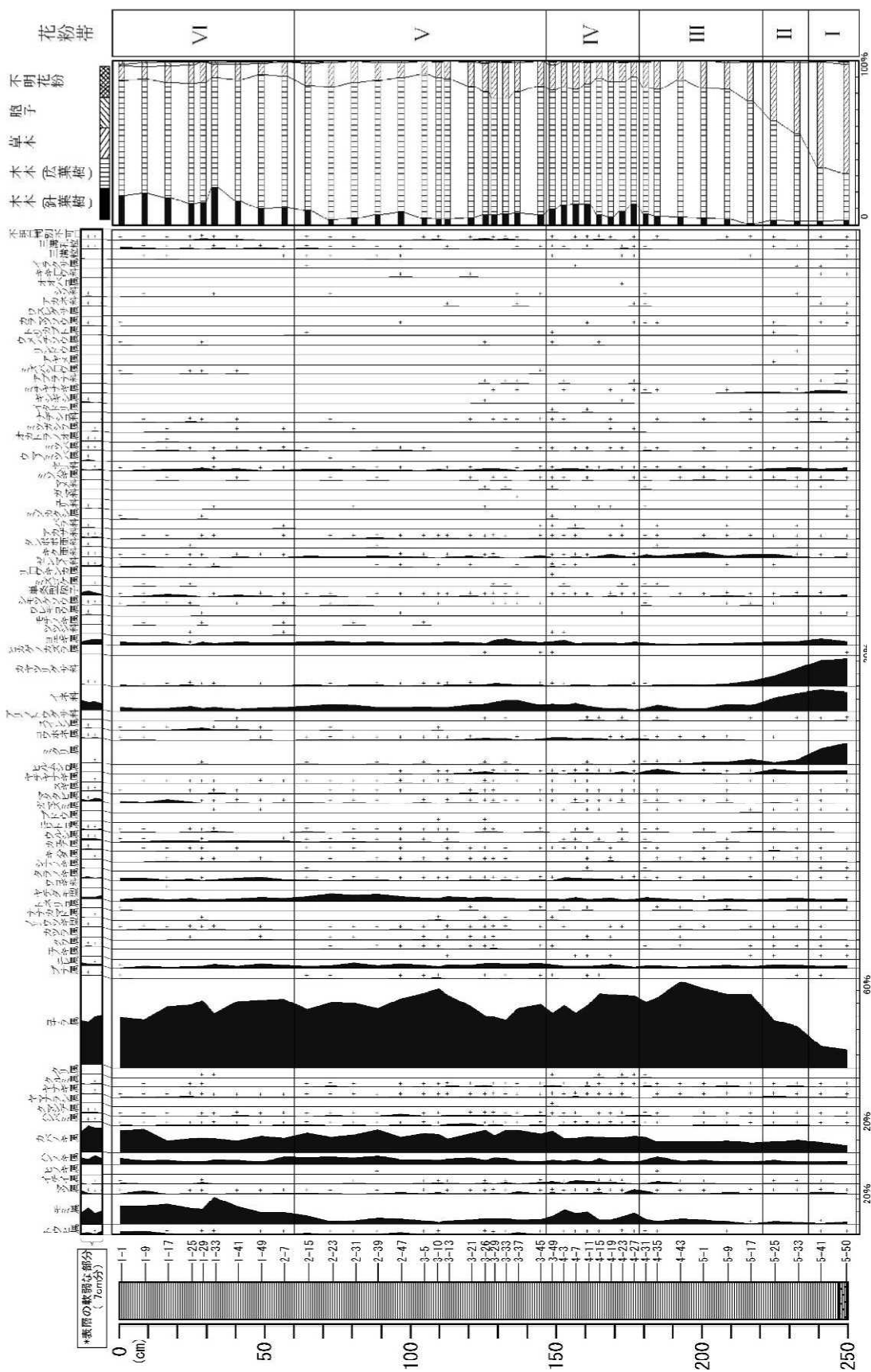
BPには、高木花粉が全体の90%となる。モミ属は約1200cal yr BPから増加し始め、約500cal yr BPには現在の組成に達する。



図(1)-5 調査地域北部の柱状図
柱状図の位置は図(1)-2を参照。柱状図右の数字は、表(1)-1に示す試料番号と年代測定値(1σの中央値)を指す。



図(1)-6 湖沼堆積物の深度と年代の関係 (A)、および堆積速度の変化 (B)



図(1)-9 Site C の花粉ダイアグラム

4) ユスリカ分析の結果 (図(1)-10~12)

ユスリカ分析の結果、いずれの地点からも産出する属は概ね共通するが、優占タクサやその時期が異なる。Site Aにおいては、約600cal yr BPまでヒゲユスリカ族が優占し、2000cal yr BPにはユスリカ属が比較的高い割合で産出する。600cal yr BP以降はクロユスリカ属が優占する。

Site Bにおいては、2500cal yr BP以前の堆積物からは、わずかししかユスリカが産出しない。2500~2000cal yr BPはユスリカ属が優占し、その後約700cal yr BPまでヒゲユスリカ属が優占する。700cal yr BP以降、再びユスリカ属が増加するが、最上部で急速に減少する。

Site Cにおいては、3400~3000cal yr BPは、ヒゲユスリカ族が最も高い割合を占める。3000~2400cal yr BPに、ユスリカ属が優占し、その後クロユスリカ属とヒゲユスリカ属が優占する組成となる。また、最上部ではホソミユスリカ属が特徴的に増加する。

(2) 考察

1) 砂丘帯の形成年代

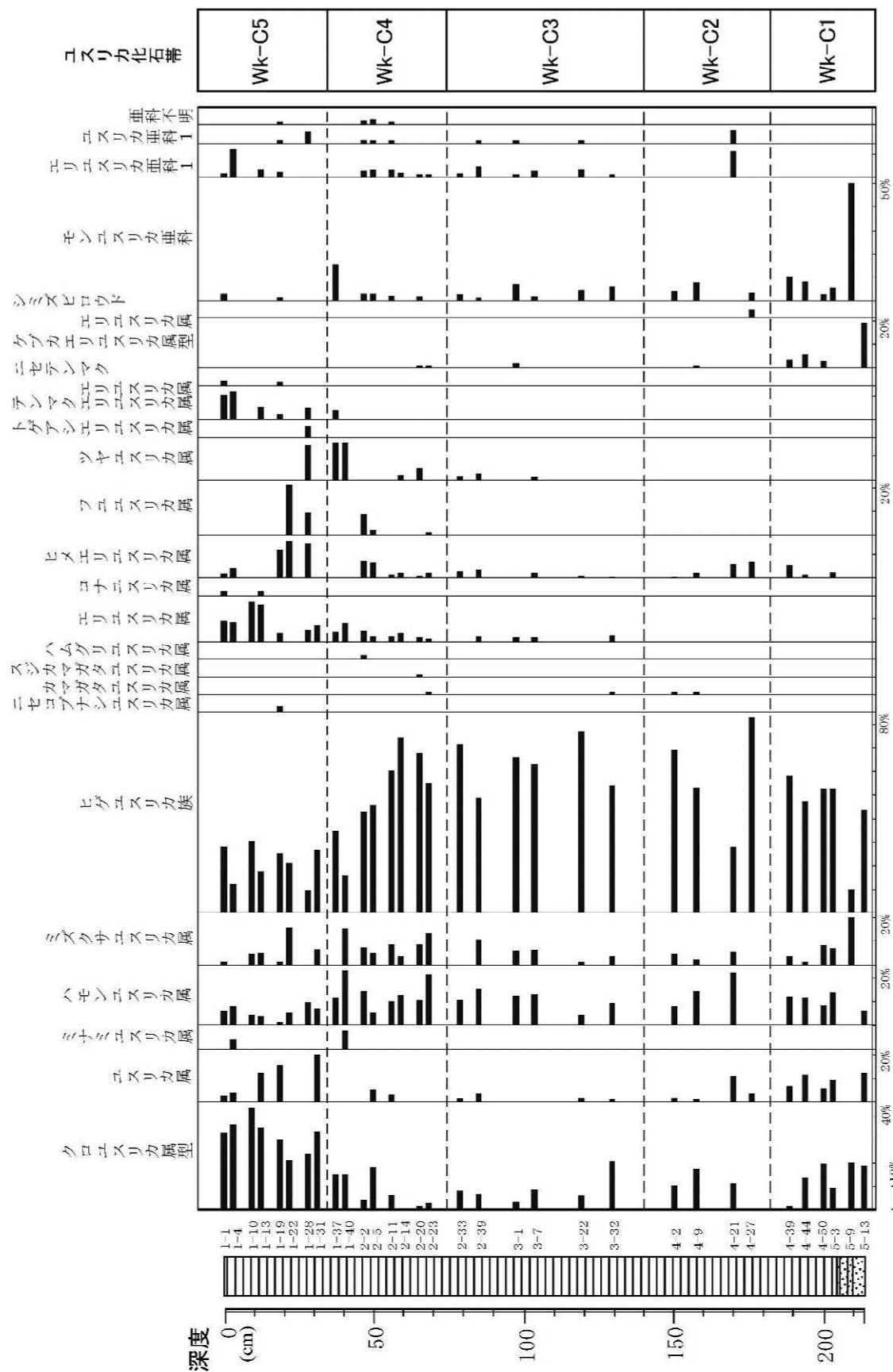
第Ⅰ砂丘帯の年代測定結果 (5690cal yr BP) および成瀬ほか (1984)⁴⁾の年代測定の結果 (5760±75yr BP=6483~6654cal yr BP) から、この地域における砂の堆積は概ね6000cal yr BPには始まっていたものと思われる。豊徳台地の西縁は、縄文海進最盛期の海食崖と考えられており、最盛期以降の海退期に砂の運搬が始まったと考えて矛盾はない。

第Ⅱ帯が、第Ⅲ帯より標高が高いことには、約4700cal yr BPの活断層の活動に伴う隆起のイベントが原因している可能性が示唆されている⁵⁾。第Ⅱ帯の砂丘列は、縄文海進後の海退期に順次内陸側より浜堤列として形成され、4700cal yr BP以前にはすでに形成されていたことになる。この砂丘帯の形状が、直線上の配列ではなく馬蹄形状に不連続に配列するのは、阪口 (1958)⁶⁾が指摘するように浜堤列形成後の風の作用による変形の可能性が高い。その年代は、約6000cal yr BPから4700cal yr BPの間となる。

第Ⅱ帯の堤間湿地堆積物 (骸泥や泥炭層) および湖沼の堆積物の堆積開始の年代は、第Ⅱ帯で約3610~1010cal yr BPにわたる。このことは、湖沼の堆積や湿地堆積物の堆積開始の年代は、同一の砂丘帯に属していてもほぼ同時に、あるいは内陸側から順次堆積を開始したわけではなく、それぞれの地点において湖沼または湿原の成立に適切な条件が整った (地下水位が上昇し過湿となった) 時点を示していると考えられる。今回の調査では、ジュンサイ小沼 (#39) 付近の湿原の堆積物基底の年代も3300cal yr BPで、湖沼や湿原の形成はこれよりは古い年代に遡らないのではないかとと思われる。

第Ⅲ帯の堤間湿地堆積物の堆積開始は、890cal yr BP、第Ⅳ帯は1590cal yr BPの年代が得られている。このことから、第Ⅳ帯の形成は、1590cal yr BP以前であり、4700cal yr BP以降のいずれかの時期ということになる。現在の海岸線近くの露頭から得られた140cal yr BPの年代は、最近の汀線付近の堆積と侵食を示していると考えられ、140cal yr BPまで継続的に砂丘が形成されてきたとは限らない。

また、海岸に近い夕来1 (図(1)-1参照) だけではなく、清明や浜里などの第Ⅱ砂丘帯の堆積物からもmodernの年代が得られていることは、砂の運搬堆積が継続しており、砂丘地形状に新期の砂が堆積しているものと思われる。



図(1)-10 Site A におけるユスリカの組成変遷図

堆出物の成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

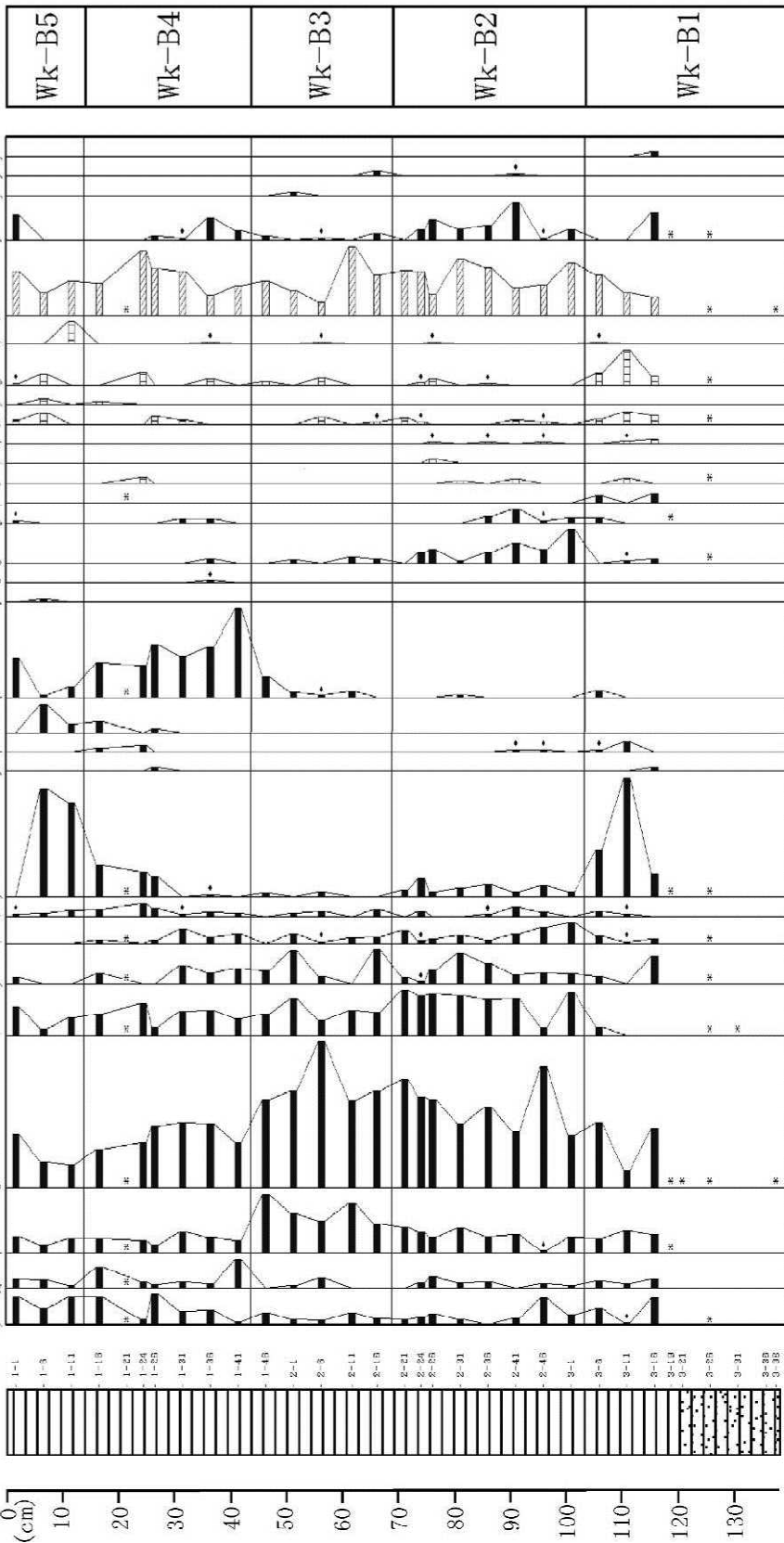
①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

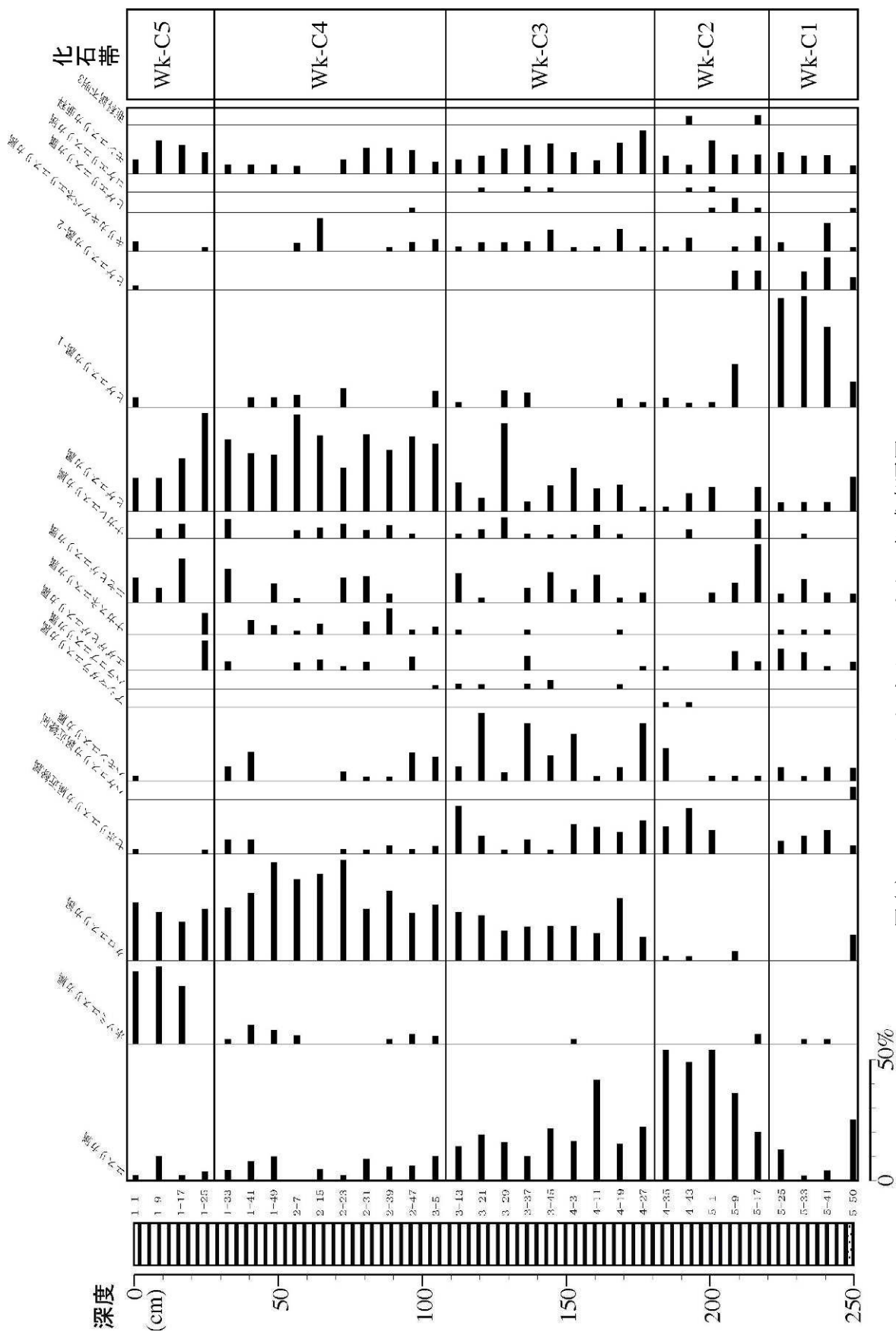
①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分

①-②③ 堆出物成分
④-⑤⑥ 堆出物成分
⑦-⑧⑨ 堆出物成分
⑩-⑪⑫ 堆出物成分
⑬-⑭⑮ 堆出物成分
⑯-⑰⑱ 堆出物成分
⑲-⑳㉑ 堆出物成分
㉒-㉓㉔ 堆出物成分
㉕-㉖㉗ 堆出物成分
㉘-㉙㉚ 堆出物成分
㉛-㉜㉝ 堆出物成分
㉞-㉟㊱ 堆出物成分
㊲-㊳㊴ 堆出物成分
㊵-㊶㊷ 堆出物成分
㊸-㊹㊺ 堆出物成分
㊻-㊼㊽ 堆出物成分
㊾-㊿ 堆出物成分



□ 10% ● : 1%以下 * : カウント総数が少ない試料中の存否 (カウント総数が少ない試料については百分率で示さず産出したものに*を付した.)

図(1)-11 Site Bにおけるユスリカの組成変遷図



図(1)-12 Site C におけるユスリカの組成変遷図

2) 砂丘植生の形成

砂丘林北部の表層花粉組成と植生の関係を判断の基準とし、ボーリングコアの花粉分析の結果を考察した(図(1)-13)。

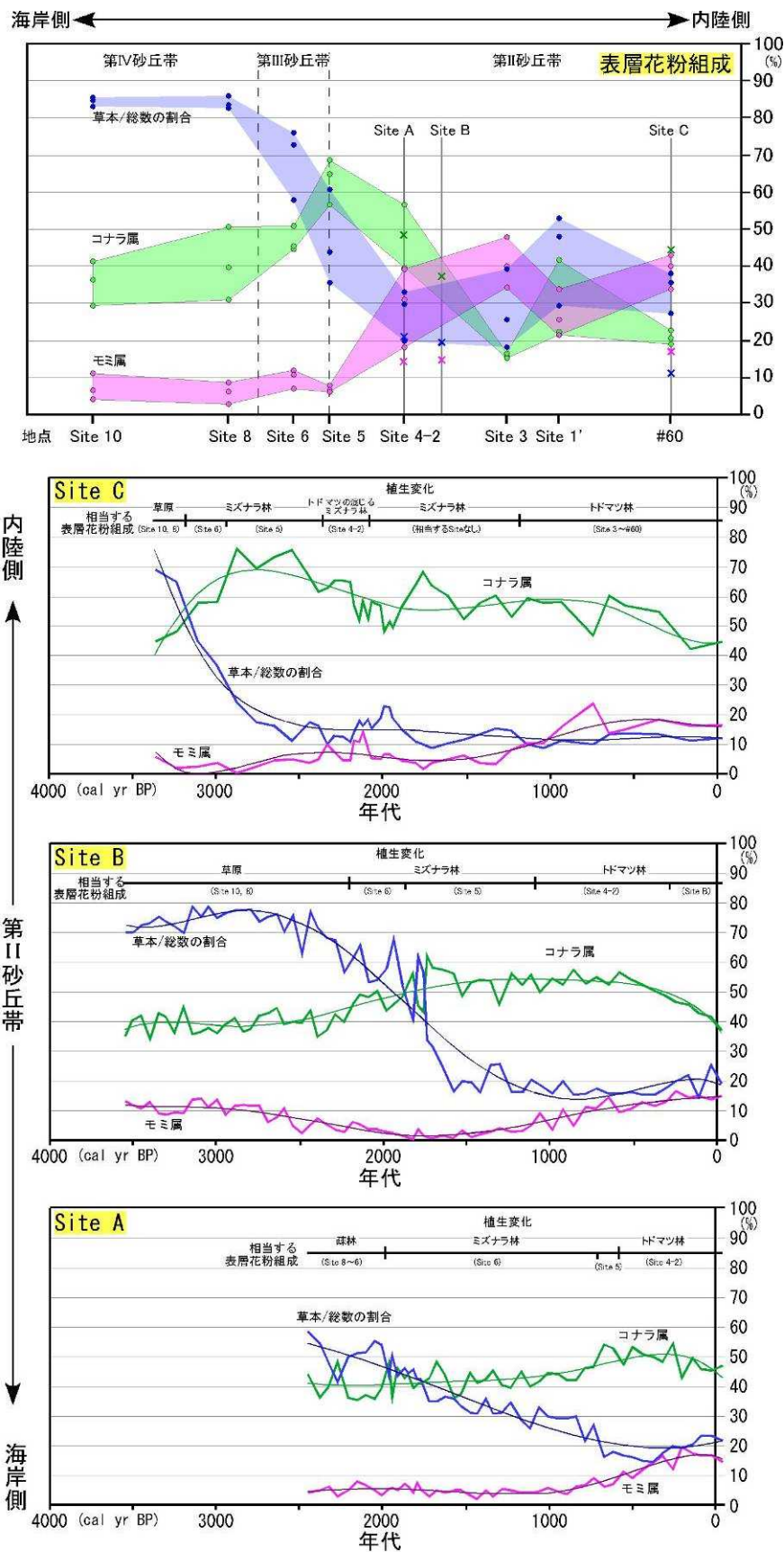
3地点の花粉分析の結果を総合すると、大局的には内陸側から順次森林が形成されてきたと考えられる(図(1)-14)。最も内陸側のSite Cにおいては、約3300cal yr BPからコナラ属が増加し始め、約2500cal yr BPにはコナラ属を主とする高木花粉の割合が90%近くに達していることから、2500cal yr BPにはミズナラ林が形成されていたと考えられる。ミズナラ林は、Site Bにおいては2300cal yr BP、Site Aにおいては2000cal yr BPに形成され始めたと考えられる。ミズナラの前線はSite CからSite Aに約1300年かかって前進した。ミズナラの侵入開始から花粉組成が最大に達する(林冠の閉じたミズナラ林)までの時間は、Site Cで約800年、Site Bで約600年、Site Aでは1300年かかっている。より海側のSiteほどミズナラ林成立に時間がかかるのは、森林の成立を阻害する要因がより強く作用していることによると考えられる。

モミ属の増加は、Site Cにおいては約1300cal yr BP、Site Bにおいては1100cal yr BP、Site Aにおいては700cal yr BPに始まる。Site CおよびBにおいて、ミズナラ林の成立に大きな時間差があるにも関わらず、モミ属の増加が100年程度の差しかないことは、トドマツの侵入が植生の遷移の結果としてではなく、より広域的な要因、すなわち気候の寒冷化に起因するのではないかと考えられる。北海道では、この時期、各地の花粉分析でトウヒ属やモミ属の増加が知られており、本地域における現象と調和的である。Site Aにおけるモミ属の増加は約700cal yr BPから始まり、ほかの2地点とは年代が異なる。この地点においては、1300~1100cal yr BPにはミズナラ林の形成途上にあると考えられ、このことがトドマツの侵入を可能にしなかった可能性がある。

花粉分析の非高木花粉の組成変化の大部分は、沼の内部に生育する水生植物と沼周縁部に生育する陸上植物の変化に由来する。下部でミクリ属やカヤツリグサ科が高い割合を占めることは、比較的水深が浅い時期の植生を示していると考えられる。上部においては、ヤチヤナギ属やモチノキ属、ゼンマイ科、ミズゴケ属などが産出するようになり、湖沼周辺の植生に湿原植生の要素が増加したこと、すなわち沼周辺が湿原化し始めたことを示していると考えられる。

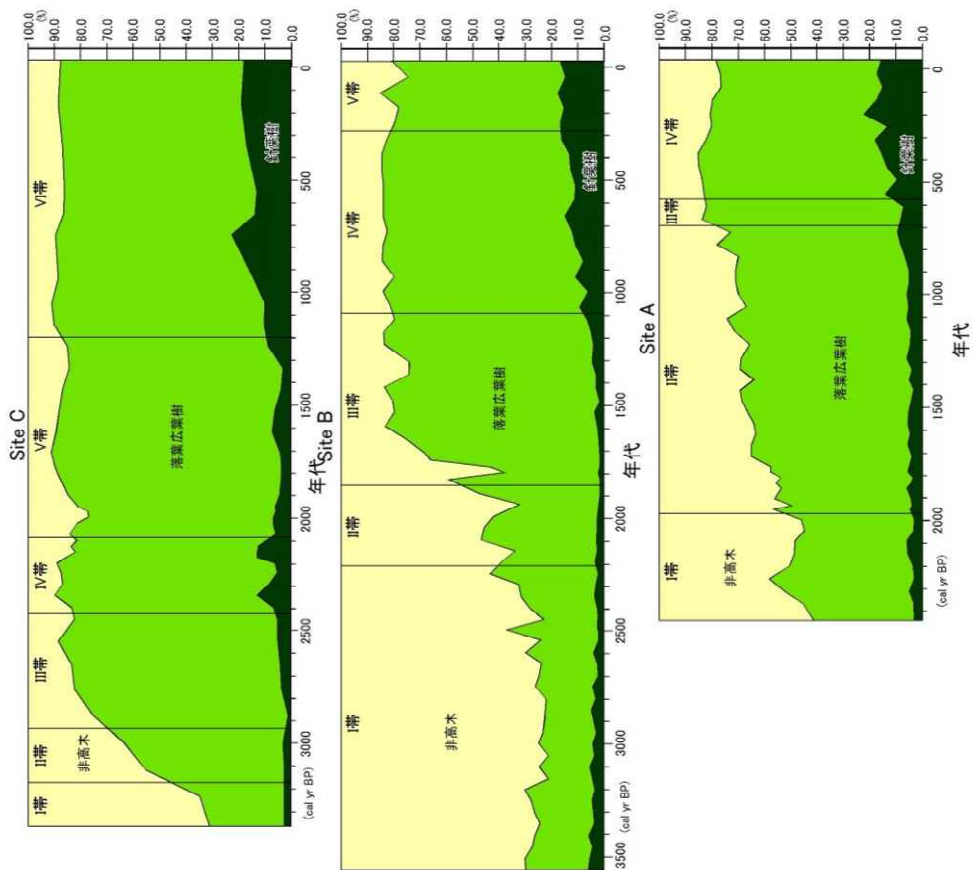
3) ユスリカ組成の変化

ユスリカ組成の分析結果は、花粉分析の結果が一定の系統性を示すのとは対照的に、産出するタクサの共通性は高いが、それぞれの湖沼において優占するタクサや群集組成の変化の時期が異なり、独自の変化を示す特徴がある(図(1)-14)。おおまかな傾向としては、湖沼形成初期にユスリカ属の割合が高い傾向はあるが、一連の変化過程は湖沼形成期からの群集の遷移を示しているようには思われない。約2000~800cal yr BPのユスリカ属の減少は3湖沼で共通しており、この時期は湖沼堆積物の堆積速度が増加した時期とも概ね一致している。何らかの共通の要因が関係している可能性があるが、今のところ不明である。

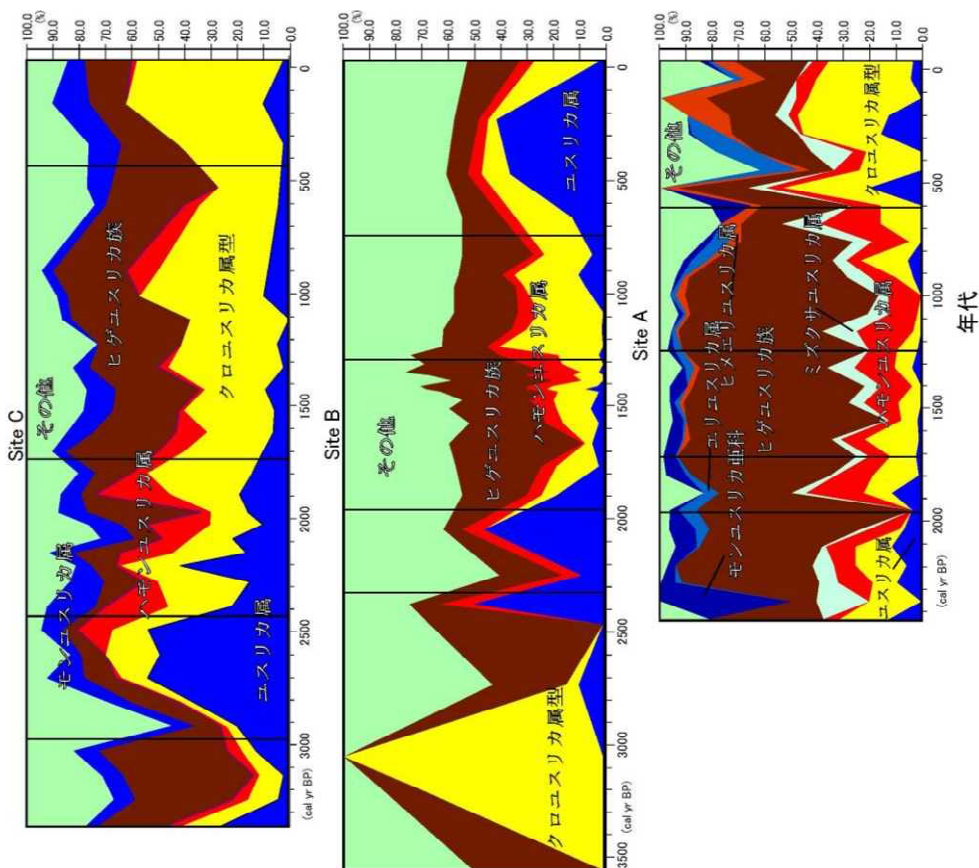


図(1)-13 表層花粉組成およびそれに基づく古植生の推定

花粉組成の変化



ユスリカ組成の変化



図(1)-14 花粉組成およびユスリカ組成の変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

この地域の砂丘地形の形成が、縄文海進後の地殻変動および海水準変動の相互作用により形成され、湖沼群の形成は、約3600cal yr BPから始まり、砂丘間湿地や湖沼における有機物の堆積は、同一の砂丘帯に位置する地点であっても、同時に開始したものでなく、早い地点から遅い地点まで少なくとも2000年以上の差が有り、それぞれの地点ごとに適切な条件が整ったときに開始されたことが示唆された。最も海側の砂丘帯の形成が少なくとも1590cal yr BPに遡ることが示された。地形の形成と植生の形成過程に関する時間スケールを提示できたと考える。

砂丘帯上の植生の形成は、現在の海岸から内陸部にわたって見られる、草原からミズナラ林・トドマツ林への変化とほぼ同様の変化が起こったと推察される。海岸植生の変遷に関する研究は、現生植生を対象とした草原植生の比較的短期間の変遷の研究は少なくないが、長期間にわたる変遷については日本では研究例がなく、具体的な事例として意義があると考えられる。

(2) 環境政策への貢献

砂丘林や湖沼群の形成の歴史を解明することは、このような特異な地形や景観が形成されるに至った様々な歴史上の要因とその時間スケールを理解し、現在眼にすることができる環境が内包している価値を評価する上で不可欠の情報である。

現在起きている、ないし今後起こりうる生態系の変化が、長期的視野でみた際にどのように位置づけられるか（看過できない重要な変化であるか、ないしは長期的にはしばしば起きていた変化であるかなど）といった、最も基本となる判断を支援する。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

1) 紀藤典夫、阿部直美子、川上洋次郎：第22回ユスリカ研究集会（2011年）

「北海道北部、長沼湖沼群における過去約3000年間のユスリカ群集の変遷」

- 2) 中畑研哉、紀藤典夫：日本第四紀学会2011年大会（2011年）
「サロベツ原野稚咲内海岸砂丘列の植生成成史」
- 3) 紀藤典夫、中畑研哉：日本生態学会第59回大会（2012）
「堆積物・花粉分析からみた砂丘林と湿原・湖沼群の形成史」

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) Hofmann, W. 1986. Chironomid analysis. Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Berglund, B. E. ed., John Wiley, Chichester, 715-727.
- 2) Reimer P.J., M G L Bailliel, E Bard, A Bayliss, J W Beck, P G Blackwell, C Bronk Ramsey, C E Buck, G S Burr, R L Edwards, M Friedrich, P M Grootes, T P Guilderson, I Hajdas, T J Heaton, A G Hogg, K A Hughen, K F Kaiser, B Kromer, F G McCormac, S W Manning, R W Reimer, D A Richards, J R Southon, S Talamo, C S M Turney, J van der Plicht, C E Weyhenmeyer. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP, Radiocarbon 51: 1111-1150.
- 3) Bronk Ramsey, C. 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates, Radiocarbon 51: 337-360.
- 4) 成瀬敏郎・瀬川秀良・福本紘・中西弘樹・村上良典・林正久. 1984. 北海道北部海岸における砂丘発達の特性. 大矢雅彦編「寒冷地における平野の特性と形成機構に関する研究報告—オホーツク海沿岸を中心として」昭和56～58年度科学研究費補助金研究成果報告書, 51-61.
- 5) 独立行政法人産業技術総合研究所 .2006. サロベツ断層帯の活動性および活動履歴調査. 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書 No. H17-1, 48pp.
- 6) 阪口豊. 1958. サロベツ原野とその周辺の沖積世の古地理. 第四紀研究 1: 76-91.

(2) 植生・生物群集の特性解明とモニタリング指標生物群の特定

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

富士田 裕子

北海道大学大学院地球環境科学研究院

岩熊 敏夫

平成21～23年度累計予算額：39,952千円

(うち、平成23年度予算額：13,152千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] ササ群落の拡大と高層湿原植生の減少が報じられているサロベツ湿原において、(1) ササ群落の拡大による湿原の光環境への影響を評価した結果、ササ密度が葉面積指数で1.0を超すと地表に到達する光は、ミズゴケ属の光保償点を下回る可能性が認められた。また、(2) 稚咲内砂丘間湿地湖沼群の植生として14群落が記載され、それらを規定する要因としては水位が最も重要であると推察された。さらに(3) 湖沼水位の低下が植生に及ぼす影響として、常に冠水する立地に生育する種の減少が示唆された。(4) 底生動物群集の現状を調査した結果、11湖沼から6綱13目28科35分類群が確認された。湖沼ごとの底生動物群集を見ると、3つのグループが認められた。これらのグループは、湖沼の底質や抽水植物の多寡などの立地環境に対応していた。

[キーワード] ササ群落の拡大、光合成有効放射、湖沼の水位低下、底生動物、底質

1. はじめに

湿原や湖沼の植生・生物群集は、水位や水質、その他さまざまな要因によって決定されており、その保全を考える上では、地域の生物相、群落・群集構成、群落・群集の維持・変動要因の解明は不可欠である。また、湿地における生物の分布は、立地環境によって規定されている面が強いことから環境の指標性が高く、有用なモニタリングツールとなりうる。

本課題の対象地域の1つであるサロベツ湿原においては、高層湿原植生へのチマキザサ侵入のモニタリングが重要課題となっている。ササ動態については、これまでの研究で地下水の動きと最も関連が強いことが示唆されており、今後はそれらの情報に基づく動態予測のほか、ササ群落の拡大が環境に及ぼす影響の解明が求められている。

また稚咲内砂丘帯においては、原因は明らかでないが、近年湿原や湖沼の水位が低下しているといわれ、それが植生や生物群集に及ぼす影響について懸念されている。湖沼を生育場所として利用する動物の中でも特に底生動物は、植物遺体の分解に対する影響を通じて、泥炭地の環境形成にも大きな影響力を有している。しかし、河川と異なり、泥炭地の湖沼の底生動物についての知見は非常に限られているのが現状である。

2. 研究開発目的

以上の状況を踏まえ、本サブテーマでは、ササ群落の拡大と高層湿原植生の減少が報じられているサロベツ湿原において、(1) ササ群落の拡大による湿原の光環境への影響を評価すること、また、稚咲内砂丘帯においては、(2) 植物群落の記載と群落規定要因の検討、および(3) 湖

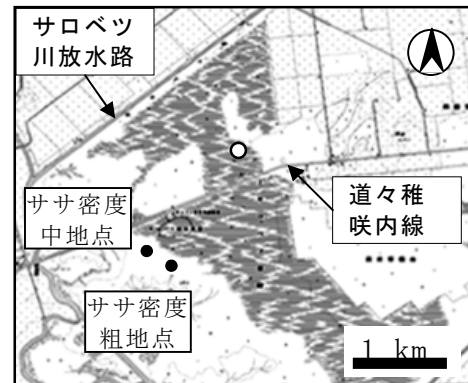
沼水位の低下が植生に及ぼす影響の解明を行った。さらに（４）湖沼底生動物群集の構造解明とそれに対する環境要因の関係の検討を行った。

3. 研究開発方法

（１）ササ群落拡大による光環境への影響

ササの動態についての基礎情報として、湿原に生育するチマキザサについて、地下部を含めたフェノロジーの把握を行った。フェノロジー観察は、ササが密生している地点では、地下茎を損傷せず掘り出すことが困難なため、高層湿原にササが侵入している地点において、2009年5～10月に無作為に選んだ10程について概ね1カ月ごとに葉数を計測し、地下茎を掘り出し先端部の形態を記録した（図(2)-1）。

ササ群落拡大による光環境への影響については、ササの密度が異なる2地点（密度中地点LAI=1.0および密度粗地点LAI=0.05）で、光合成有効放射計を用いてササ群落キャノピーの直上と地表面で光合成有効放射量を観測した。



図(2)-1 サロベツ湿原調査地点

● 光合成有効放射測定地点、○ フェノロジー観察地点

（２）雑咲内砂丘間湿地・湖沼群の群落記載と群落規定要因の検討

対象地域の植物群落を網羅できるように植生調査を行い、得られた植生資料（2009・2010年7～8月実施の現地植生調査による111地点および既存報告資料より70地点）の優占度を用いて、二次元指標種分析（TWINSPAN）による群落分類を行った。その際、湖沼植物群落と湿地生植物群落では構成種が大きく異なっていたため、湖沼植生と湿原植生に分けて解析した。TWINSPANでは、プセウドスピーシスカットレベルを0, 2, 4、分割回数を5回、最小分割グループ数を10とした。なお、出現頻度が5%以下の種は解析から除外し、優占度+は0.5とした。次に、除歪対応分析（DCA）を行うことで、群落を規定する要因を検討した。

（３）湖沼水位の低下が植生に及ぼす影響の解明

2005年と2009年の空中写真より、2005年から2009年にかけての開放水面面積の減少が著しい3湖沼と、開放水面面積の変化が少ない3湖沼を選び、地形測量、湖沼水位の測定（1回／時間）、および合計128地点での植生調査を行った（表(2)-1）。地形測量結果と湖沼水位の測定結果より、各植生調査地点における冠水日数を求め、冠水日数に対する植物種毎の被度の関係を調べた。その際、冠水日数は6つの湖沼全てで水位データが取得できた2010年7月16日 - 8月20日の36日間について求め、植物種は全128調査区での出現回数が26回以上（20%以上）の10種について検討した。

表(2)-1 調査対象湖沼の面積変化

湖沼の 区分	湖沼番 号	開放水面面積 (m ²)		
		2005年	2009年	減少率*
変化少	#51	117,534	115,947	-1.4
	#65	6,387	6,329	-0.9
	#124	13,755	14,059	2.2
減少 顕著	#110	4,609	192	-95.8
	#112	7,064	3,016	-57.3
	#123	625	500	-20.0

*減少率 (%) = (2009年の面積 - 2005年の面積) / 2005年の面積

(4) 底生動物の群集構造解明と立地環境との関係

1) 調査対象湖沼

表(2)-2に示した11湖沼を対象とした。2005年撮影の空中写真および2003年の航空機レーザープロファイラーによる地表高データをもとに、GIS (ArcGIS 9.3) を用いて求めた湖沼の開放水面面積、湖岸周囲長、湖沼の集水面積を表(2)-2に示す。

表(2)-2 調査対象湖沼の概要

湖沼No	湖沼 面積 (a)	湖岸 周囲長 (m)	湖沼の 集水面積 (m ²)
#51	1175.3	3141	3476.8
#59	63.9	642	462.6
#60	137.6	765	543.6
#65	149.9	871	480.4
#106	13.1	199	80.9
#107	7.3	115	332.1
#110	46.1	364	1505.0
#112	70.6	448	500.1
#123	6.3	97	332.2
#124	40.0	288	478.6
#125	957.0	2047	2443.8

2) 底生動物

底生動物分析用の底泥試料は、2011年7月19日～21日に、各湖沼の湖心と湖岸にて以下の方法で定量採集した。

各湖沼の湖心と湖岸において、水深が浅い場合はサーバーネット（口径25cm×25cm×80cm、網目サイズ0.45mm）、水深が深い場合は開口25cm、網の長さが50cm、網目サイズが0.45mmのDフレームネットを用いて、25cm×25cmの範囲を選んで、その中の底質、植物など（深さは5cm以内）をネット内に押し込むか曳いて底質を採集した。採集した底質を現地でバケツにあげて、バケツ内で大型植物や落ち葉などについている底生動物を洗い落とした。最終的にバケツ内で洗い落とす事が不可能な底泥試料（泥、デトリタス）を5%のホルマリンで固定後、室内に持ち帰った。

室内では、サンプルを網目サイズ0.2mmのネットに入れて、水でホルマリンを洗い流した後、白いバットにサンプルを広げ、肉眼で動物を拾い出した。拾い出された動物は実体顕微鏡などを用いて種を同定し、種毎の個体数と湿重量を計測した。

3) 水質

底泥試料の採取を行った際に、各湖沼において、水温（SK-250WP、佐藤計量器製作所）、pHと電気伝導度（EC、WM-22EP、TOA-DKK社製）、酸化還元電位（ORP）（RM-20P、TOA-DKK社製）を測定した。また、同時に湖沼表層の水50 ml を研究室に持ち帰り、イオンクロマトグラフにより主

要無機イオン (PO_4^- , F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) を測定した。

4) データ解析

本調査の結果を以下の様に分析した。

- a) 湖心、湖岸で採集された底生動物種の違いをみるために、それぞれの出現種の個体数と湿重量を科・亜科でまとめ、除歪対応分析 (DCA) を行った。
- b) 各湖沼で採集された底生動物種の違いをみるために、各湖沼で採集された種の個体数と湿重量を目でまとめ、除歪対応分析 (DCA) を行った。
- c) b) の解析にあたっては、個体数と湿重量を対数変換 ($Y=\log(X+1)$) して解析に供した。また a) の解析では、出現頻度20% (出現回数4回) 以下の科・亜科は除外した。
- d) 各湖沼の立地環境について知るため、主成分分析 (PCA) を行った。解析にあたって、まずイオンクロマトグラフによる無機イオンデータのみを主成分分析を行い、得られた主成分を次の解析に用いることにした。次の解析では、EC、pH、湖水透視度、湖底堆積物の有機物分解度、湖沼面積、湖沼面積当たりの集水域面積、湖沼の単位周囲長あたりの沼面積 (沼の形の複雑さを示す)、および1回目の解析による水質についての第1主成分、の計8変量を解析に供した。

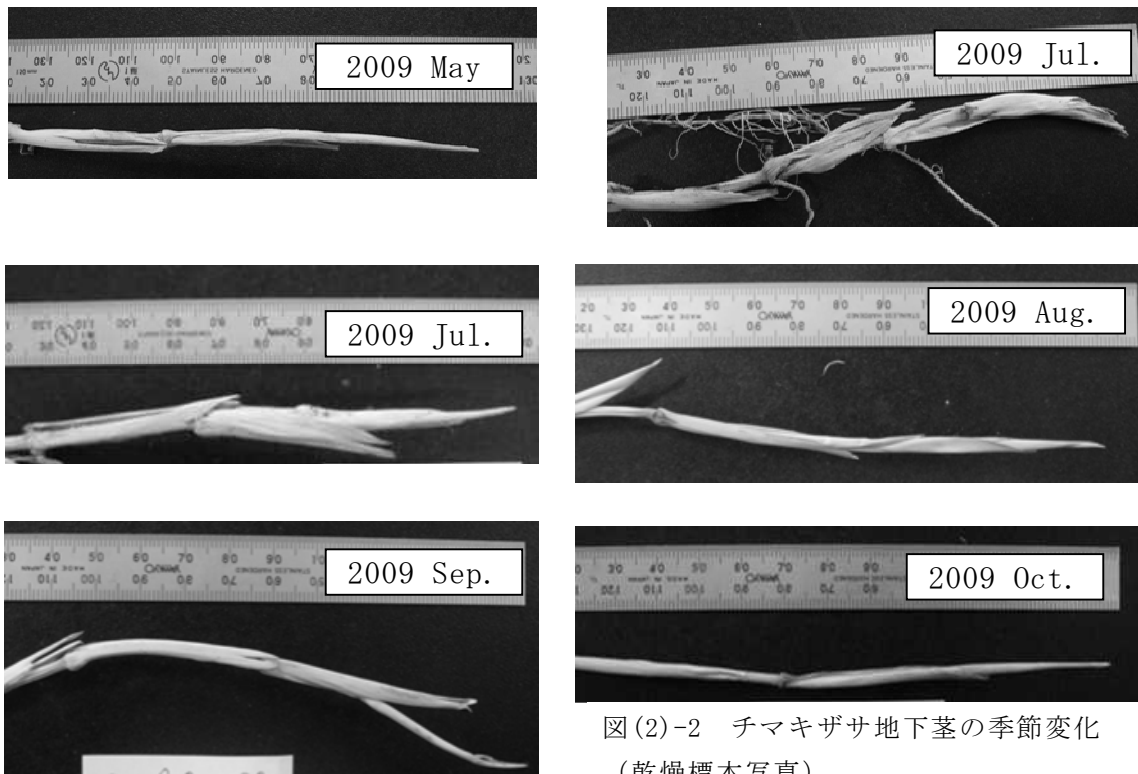
4. 結果及び考察

(1) ササ群落拡大による光環境への影響

チマキザサのフェノロジー：観察開始時に確認した越年葉は、少ないシュートで3枚、多いシュートで8枚であった。これらの越年葉は、7月以降落葉を開始し、8月下旬以降に落葉が顕著になり、10月22日の観察時には全て落葉していた。当年葉は、5月末以降に展葉を開始し、8月末には展葉を終了、それ以降多少落葉し、10月22日の時点の葉数は、5月25日の観察開始時の越年葉の枚数と同程度となっていた。なお落葉した当年葉は、途中で生長を停止した葉長2cm以下のものが殆どであった。以上のことから、今回調査を行った地域におけるチマキザサの葉フェノロジーは、5月下旬から8月が展葉期で、葉数は8月に最多となり、8月下旬以降が落葉期といえる。また、越年葉全てが落葉したことから、この地域の葉寿命は満2年に満たないと推測された。1980年のサロベツ湿原におけるチマキザサの地上部フェノロジー観察結果 (高桑・伊藤 1986)¹⁾ と比較すると、1980年は当年葉の展葉が10月まで続いたとあり、その点で今回の結果と異なっていたが、現存量のピークが8月であること、10月には越年葉は殆どなくほぼ当年葉のみとなること、10月時点で、5月の観察開始時程度の葉数となることなどは共通していた。したがって、年ごとの気象条件等によって多少の変動はあると考えられるが、この地域のチマキザサの葉フェノロジーは概ね上述のようであると考えられる。

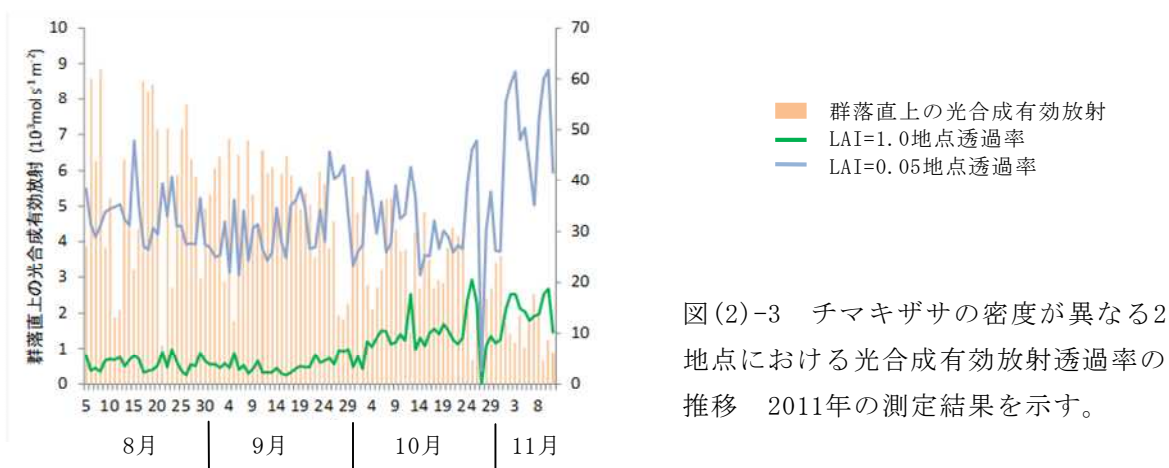
観察時の地下茎の様子を図(2)-2に示す。5月25日時点では、地下茎の先端は比較的堅く、苞葉につつまれていた。7月上旬には苞葉が開き、そこから伸長を開始しようとしている様子が認められた。それ以後10月22日の観察に至るまで、地下茎の先端は比較的柔らかく、伸長中であると考えられた。ケネザサ (タケ科メダケ属 *Pleioblastus shibuyanensis* var. *basihirsutus*) やチシマザサ (*Sasa kurilensis*) についての器官別重量や貯蔵澱粉量の季節変化を調べた例では、5-6月に前年の貯蔵物質を用いて新稈や枝の伸長が始まり、それに伴って地下部重量が低下、その後7月より10月頃まで地下茎の伸長によって地下部重量が回復し、翌年に備えることが報告されている (上

田・内村 1958 ; Oshima 1961) ²⁾³⁾。本調査を行ったチマキザサについても、7月上旬には既に幾つかの当年葉が展開していたのに対して、地下茎は7月上旬から伸長を開始していたことから、ケネガサやチシマザサと同様の資源配分様式をもっていると考えられる。



図(2)-2 チマキザサ地下茎の季節変化 (乾燥標本写真)

ササ群落拡大による光環境への影響 (図(2)-3) : ミズゴケ類の生育が認められるササ密度粗地点 (LAI=0.05) では、光合成有効放射 (PAR) の透過率は $33.7 \pm 9.5\%$ 前後であったが、ササ密度中地点 (LAI=1.0) ではPAR透過率は $6.9 \pm 4.6\%$ であった。ササ密度中地点の場合、地表に到達するPARがミズゴケの光補償点 (Harley et al. 1989) ⁴⁾を下回る恐れがあり、ササの侵入によって湿原植生のさらなる変化を促す可能性が考えられた。



図(2)-3 チマキザサの密度が異なる2地点における光合成有効放射透過率の推移 2011年の測定結果を示す。

(2) 稚咲内砂丘間湿地・湖沼群の群落記載と群落規定要因の検討

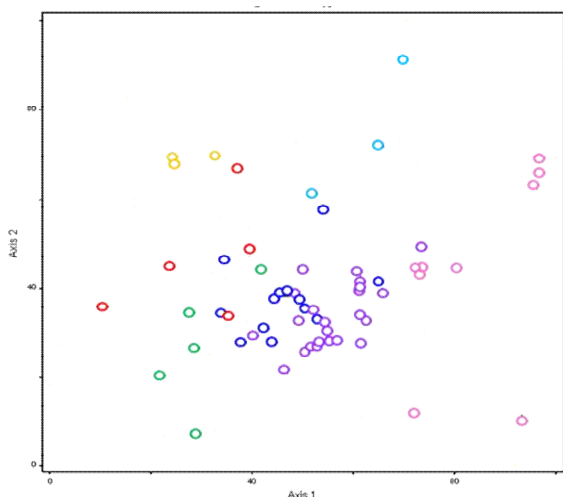
TWINSPANによる群落分類の結果、湖沼植生として7群落、湿原植生として7群落を認めた(表(2)-3、表(2)-4)。湖沼植生と湿原植生に対する除歪対応分析の結果、両方とも、第1軸と第2軸によって群落間の差異を表すことができた(図(2)-4、図(2)-5)。このことは、稚咲内砂丘間の湖沼の群落、湿原の群落はそれぞれ2つの要因によって概ね規定されていることを示唆している。

表(2)-3 湖沼植生群落分類結果

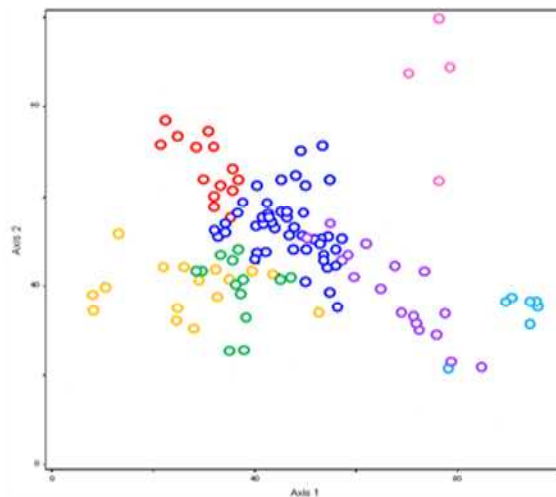
群落名	調査 区数	平均出 現種数	優占種・高常在度種
オオカサスゲ群落	3	3.3	オオカサスゲ
クロヌマハリイ・コタヌキモ群落	5	4.8	クロヌマハリイ、コタヌキモ、ドクゼリ、ウキクサ
ドクゼリ・オニナルコスゲ群落	5	4.4	ドクゼリ、オニナルコスゲ、ヤナギトラノオ
コウホネ・ホソバドジョウツナギ群落	13	5.0	コウホネ、ホソバドジョウツナギ、オオヌマハリイ
コウホネ・タヌキモ群落	23	4.9	コウホネ、タヌキモ、フトイ
ヒメカイウ・フサモ群落	3	5.3	ヒメカイウ、フサモ
ネムロコウホネ・フトイ群落	9	2.0	ネムロコウホネ、フトイ

表(2)-4 湿原植生群落分類結果

群落名	調査 区数	平均出 現種数	優占種・高常在度種
ヨシ・コウホネ群落	16	4.1	ヨシ、コウホネ、トウヌマゼリ
ヨシ・ツルスゲ群落	14	4.4	ヨシ、ツルスゲ、ドクゼリ
エゾイヌゴマ・クサヨシ群落	14	6.4	エゾイヌゴマ、クサヨシ、エゾシロネ、イワノガリヤス
ヨシ・イワノガリヤス群落	46	6.3	ヨシ、イワノガリヤス、エゾシロネ
ツルコケモモ・ヌマガヤ群落	17	7.7	ツルコケモモ、ヌマガヤ、ヒメシダ
ツルコケモモ・タチギボウシ群落	7	6.0	ツルコケモモ、タチギボウシ、ホロムイイチゴ
チマキザサ群落	4	4.8	チマキザサ、ヤチヤナギ



図(2)-4 湖沼植生に対する除歪対応分析結果
 ○オオカサスゲ群落、○クロヌマハリイ・コタヌキモ群落、○ドクゼリ・オニナルコスゲ群落、○コウホネ・ホソバドジョウツナギ群落、○コウホネ・タヌキモ群落、○ヒメカイウ・フサモ群落、○ネムロコウホネ・フトイ群落



図(2)-5 湿原植生に対する除歪対応分析結果
 ○ヨシ・コウホネ群落、○ヨシ・ツルスゲ群落、○エゾイヌゴマ・クサヨシ群落、○ヨシ・イワノガリヤス群落、○ツルコケモモ・ヌマガヤ群落、○ツルコケモモ・タチギボウシ群落、○チマキザサ群落

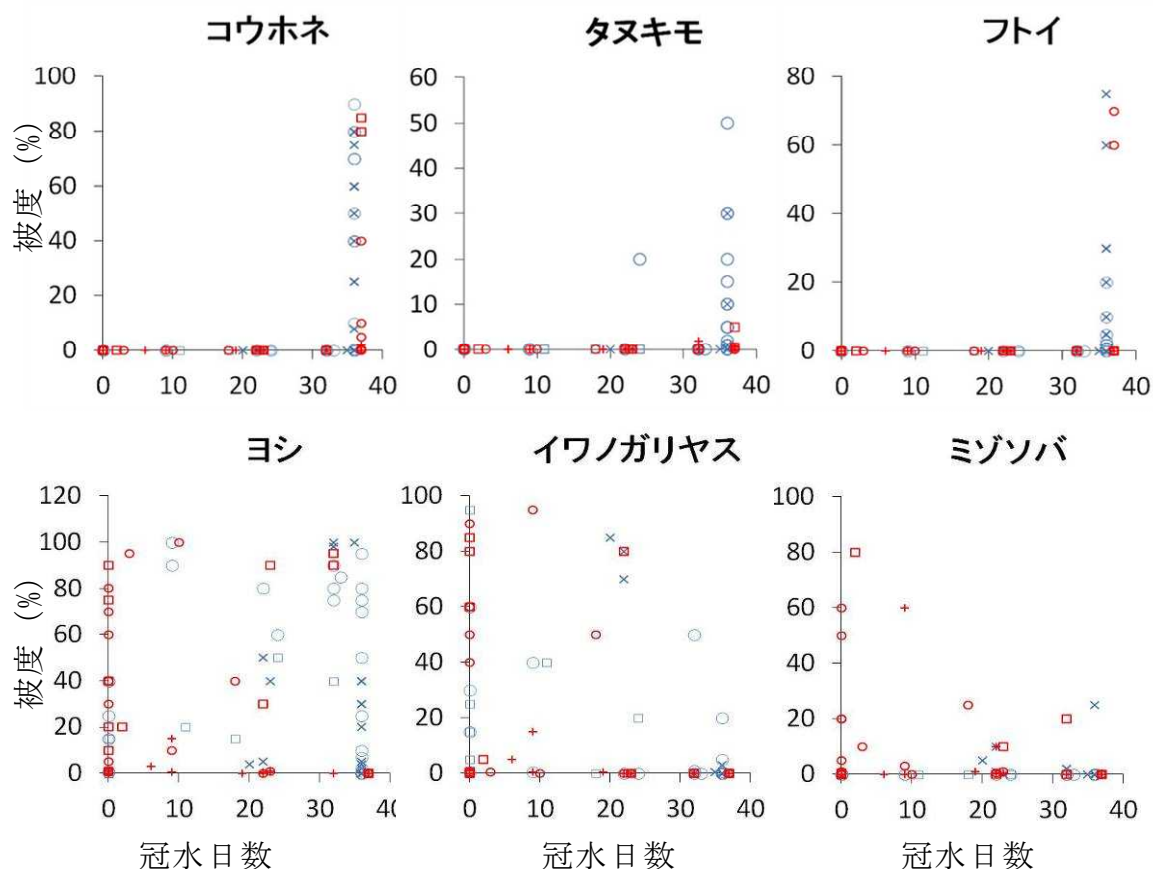
湖沼植生に対する除歪対応分析の結果を第1軸についてみると、オオカサスゲ群落、クロヌマハリイ・コタヌキモ群落、ドクゼリ・オニナルコスゲ群落が同程度で最も小さく、コウホネ・ホソバドジョウツナギ群落は次に小さく、コウホネ・タヌキモ群落とヒメカイウ・フサモ群落が同程度で続き、ネムロコウホネ・フトイ群落が最も大きい位置に配置された。稚咲内湖沼群においては、ネムロコウホネは最も水深の深い場所に生育し、オオカサスゲやドクゼリは水深の浅い場所に、コウホネやタヌキモなどはそれらの中間的な水深の場所に生育している。したがって第1軸は湖沼の水深に対応した軸と考えられる。第1軸上でほぼ同じ配置を示した群落について、第2軸に対する位置をみると、小さい方から、クロヌマハリイ・コタヌキモ群落、ドクゼリ・オニナルコスゲ群落、オオカサスゲ群落の順に配置された。また同じく、第2軸に対して、コウホネ・タヌキモ群落が小さく、ヒメカイウ・フサモ群落が大きい位置に配置された。一般にオオカサスゲやヒメカイウは流水や泥土の供給があるような富栄養な立地に生育し、タヌキモやコタヌキモはより止水的な立地にみられる。したがって、第2軸は流水的な環境か止水的な環境かに関係すると考えられたが、裏付けとなるデータをとってより詳細な検討を加える必要がある。

湿原植生に対する除歪対応分析の結果を第1軸についてみると、ヨシ・コウホネ群落が最も小さく、エゾイヌゴマ・クサヨシ群落とヨシ・ツルスゲ群落が同程度で次に小さく、ヨシ・イワノガリヤス群落、ツルコケモモ・ヌマガヤ群落の順に続き、チマキザサ群落とツルコケモモ・タチギボウシ群落が同程度で最も大きい位置に配置された。ツルコケモモやチマキザサは通常地表水のない場所に生育し、コウホネは通常湖沼に生育している。したがって第1軸は湿原の水位に対応した軸と考えられる。第1軸上でほぼ同じ位置に配置された群落について、第2軸に対する位置をみると、ヨシ・ツルスゲ群落が小さく、エゾイヌゴマ・クサヨシ群落が大きい位置に配置された。

また同じく第2軸に対して、ツルコケモモ・タチギボウシ群落が小さく、チマキザサ群落が大きい位置に配置された。ヨシに比較してクサヨシは流れのあるところに生育し、ツルコケモモ等の生育する中間～高層湿原とチマキザサの生育する立地も異なっている。したがって第2軸も何らかの環境傾度に対応していると考えられるが、より詳細な検討が必要である。

(3) 湖沼水位の低下が植生に及ぼす影響の解明

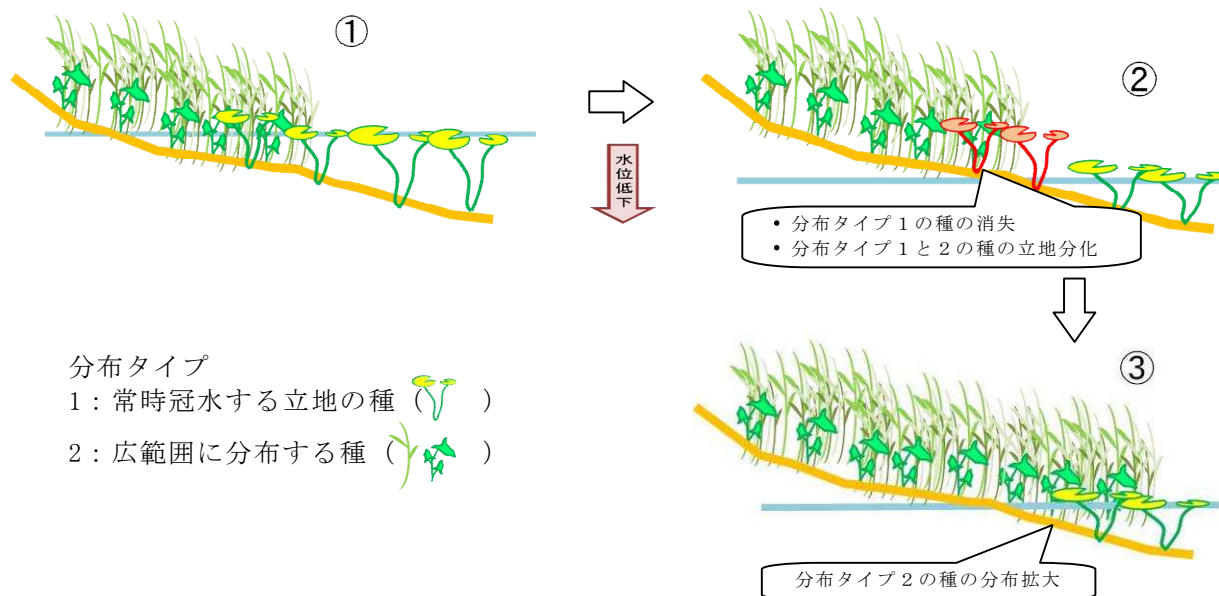
植物種の被度と冠水頻度の関係には以下の2つの分布タイプが認められた(図(2)-6)。タイプ1: 常に冠水する立地に生育する種(コウホネ、タヌキモ、フトイなど)、タイプ2: 生理的には全く冠水しない立地から常に冠水する立地まで生育可能だが、開放水面面積の減少が顕著な湖沼では比較的乾燥した立地に分布が偏っている種(ヨシ、イワノガリヤス、ミゾソバなど)。



図(2)-6 冠水日数と植物種の被度の関係 冠水日数は、2010年7月16日 - 8月20日の36日間について求めた。分布タイプ1: 上段の3種、分布タイプ2: 下段の3種 について示す。分布タイプについては本文参照。×#51、○#65、□#124、+#110、◇#112、◇#123

開放水面面積の減少が湖沼水位の低下によると仮定すると、湖沼水位の低下が植生に与えた影響として以下の事が示唆された。タイプ1の種は、生理的な制限によって冠水する立地のみ生育可能な種で、湖沼水位が低下し冠水しなくなった立地において消失すると考えられた(図(2)-7の②の状態)。タイプ2の種は、湖沼水位が低下したことで結果的に乾燥した立地に偏った分布を示

したと考えられた（図(2)-7の②の状態）。また、湖沼水位が低下した状態が継続した場合の植生は、タイプ2の種が再び分布を広げることが推測された（図(2)-7の③の状態）。なお、図(2)-7の模式図によれば、空中写真で確認される開放水面面積の減少は、①から②へのシフト、および、②から③へのシフトのどちらかを検知していると考えられる。



(4) 底生動物の群集構造解明と立地環境との関係

1) 環境概要

調査した湖沼の物理環境を、表(2)-5 に示した。湖沼の面積について、1000 アール前後の大きな湖沼は#51 と#125、100～150 アールの湖沼は#60 と#65、40～70 アール前後の湖沼は#59、#110、#112、#124、15 アール以下の湖沼は#106、#107、#123 であった。また#60 と#125 を除いた湖沼は2009年の面積が2005年の面積より減少していた。各湖沼のpHはいずれも5.7以下であった。ECは各湖沼の間にバラつきがみられ、最大は#107の27.2mS/m、最小は#123の2.8mS/mであった。透視度は、#124が100cmを超えたが、他の湖沼がいずれも65cm以下であった。底質は100アールを超す#51 と#125 が砂質と有機物で、その他の湖沼はいずれも有機物のみであった。植生は多くの湖沼で、湖岸と湖心にコウホネ、スゲ属、ヨシが出現したが、一部の湖沼の湖心では植物がみられなかった。酸化還元電位は#60を除いたすべての湖沼で正の値であり、値のバラつきが大きかった。底質分解度は殆どの湖沼において湖心が湖岸より分解が進んでいた。

各湖沼の湖心と湖岸の個体数優占種（上位1種）はユスリカ科の種が占めるケースが多かった。湿重量優占種は単位個体湿重量が軽いユスリカ科の種が占めるケースは少なかった。#125の湖心でオオエゾヨコエビが個体数と湿重量の優占種として出現したのは特徴的であった。

水質の結果は表(2)-6 に示すとおりである。陰イオンのCl⁻は#123で顕著に少なかった。陽イオンのNa⁺は#60、#123、#124、#126で10mg/L、Ca²⁺は#59、#60、#123、#124、#126で1.0mg/L以下、

Mg²⁺は#59、#60、#123、#124、#125、#126 で 1.0mg/L 以下であった。栄養塩とした NO₃-N は#51、#59、#65、#107、#112、#124 で 0.03mg/L 以上であった。NH₄-N は#106 のみで計測された。PO₄⁻ は#51、#59、#60、#123 で 0.4mg/L 以上であった。

表(2)-5 各湖沼の特徴と優占する底生動物の分類群

湖沼No.	湖沼面積 (a)	(2009年面積 -2005年面積) /2005年面積×100	pH	EC (mS/m)	透視度 (cm)	底質	植生	採集箇所	ORP (mV)	底質分解度	個体数優占種	湿重量優占種
#51	1175.3	-1.4	5.3	17.6	64.0	砂+有機物	コホネ ヨシ、オニオスゲ	湖心 湖岸	136	3	ユスリカ亜科	オオタニシ
#59	63.9	-0.9	4.2	9.4	51.5	有機物	オニヒルムシロ イワカサガ	湖心 湖岸	340	3	ユスリカ属	キリハネトビケラ属
#60	137.6	2.2	4.2	7.1	30.0	有機物	コホネ イワカサガ	湖心 湖岸	—	4	ユスリカ亜科	ユスリカ亜科
#65	149.9	-3.7	4.9	26.6	60.5	有機物	コホネ ヨシ	湖心 湖岸	32	3	ユスリカ属	ユスリカ属
#106	13.1	-50.8	5.5	15.9	12.5	有機物	コホネ タヌキモ	湖心 湖岸	91	4	ユスリカ亜科	アイトトンボ
#107	7.3	-82.7	4.2	27.2	17.0	有機物	なし ミドリ	湖心 湖岸	142	3	ユスリカ亜科	ヒメスズガネ
#110	46.1	-95.8	5.2	18.4	28.5	有機物	タヌキモ イワカサガ	湖心 湖岸	21.9	3	アイトトンボ	アイトトンボ
#112	70.6	-57.3	5.7	26.1	18.0	有機物	コホネ オオカサガ	湖心 湖岸	74	4	カタカネトンボ	カタカネトンボ
#123	6.3	-20.0	4.2	2.8	25.5	有機物	コホネ ヨシ	湖心 湖岸	293	2	ヒゲユスリカ族	イシビル科
#124	40.0	-1.3	4.5	6.6	>100	有機物	なし ヨシ	湖心 湖岸	242	4	ユスリカ属	アイトトンボ
#125	957.0	0.4	5.7	14.5	29.5	砂+有機物	なし オニオスゲ	湖心 湖岸	24.8	4	オオエゾヨコエビ	オオエゾヨコエビ
										1	ユスリカ亜科	マツモムシ

説明

底質分解度について、以下の基準である。

- 1 植物の葉も原形を留める。
- 2 葉は腐っており、原形をとどめない。
- 3 葉は腐っており、茎もちぎれている。
- 4 5mm くらいの断片が認められる。デトリタス
- 5 有機物の原形がない。泥のよう。

ORP(酸化還元電位) の計測は湖沼の表面にて計測したものである。

優占種の場合は上位1種であるが、個体数が同様な場合は、同じ個体数で湿重量が重い方が個体数と湿重量の上位1種とした。

表(2)-6 各湖沼の無機イオン分析結果

No.	PO4-	F	CL	BR	NO3	SO4	NA	NH4	K	CA2+	MG2+
#51	0.616	0.052	36.477	0.082	0.054	4.435	14.981	0.000	1.608	1.385	2.075
#59	0.567	0.051	22.120	0.048	0.038	3.969	10.759	0.000	1.350	0.944	0.901
#60	0.481	0.036	18.674	0.038	0.000	3.331	8.318	0.000	1.319	0.725	0.841
#65	0.590	0.043	58.763	0.137	0.037	10.824	25.423	0.000	1.593	2.223	1.423
#106	0.000	0.070	34.570	0.094	0.000	4.416	15.091	0.215	2.412	1.721	1.539
#107	0.000	0.054	68.145	0.166	0.065	7.643	25.720	0.000	0.832	3.889	3.617
#110	0.000	0.050	45.358	0.143	0.000	3.694	19.491	0.000	0.855	2.444	1.245
#112	0.000	0.059	62.814	0.198	0.035	2.735	25.914	0.000	1.037	3.676	2.403
#123	0.829	0.095	4.666	0.000	0.000	9.060	5.150	0.000	0.000	0.396	0.083
#124	0.000	0.092	14.276	0.024	0.039	5.322	7.567	0.000	0.473	0.577	0.487
#125	0.000	0.012	34.785	0.044	0.000	7.641	14.794	0.000	1.143	1.766	0.754
#126	0.000	0.000	11.100	0.000	0.000	1.185	6.120	0.000	0.344	0.364	0.147

2) 湖沼群全体の分類群組成

表(2)-7に示すとおり、今回の調査で11個の湖沼から6綱13目28科35分類群が確認された。種組成を見ると、昆虫綱の種数が最も多かった。昆虫綱の中ではハエ目の種数が最も多かった。これらの種は概ね止水環境を好む種である。

底生動物は摂食方法によって4つの摂食機能群に（表(2)-8）、形態的特徴と微生息環境との対応関係によって6つの生活型に区分される（表(2)-9）。種数では摂食機能群別にみると、捕食者が57%を占め最も高かった。一方破碎食者が9%を占め、最も低かった。生活型別にみると、匍匐型と遊泳型がそれぞれ31%を占め最も高かった。一方固着型がまったく確認されなかった。

表(2)-7 出現した分類群

綱	目	科	分類群数
腹足綱	原始紐舌目	タニシ科	2
	基眼目	ヒラマキガイ科	1
二枚貝綱	マルスダレガイ目	マメシジミ科	1
ミミズ綱	イトミミズ目	イトミミズ科	1
ヒル綱	無吻蛭目	ヒルド科	1
		イシビル科	1
軟甲綱	ヨコエビ目	キタヨコエビ科	1
	ワラジムシ目	ミズムシ科	1
昆虫綱	トンボ目	アオイトトンボ科	1
		イトトンボ科	1
		ヤンマ科	1
		サナエトンボ科	1
		エゾトンボ科	1
		トンボ科	1
	カメムシ目	アメンボ科	1
		ミズムシ科	1
		コオイムシ科	1
		マツモムシ科	1
	ヘビトンボ目	センブリ科	1
	トビケラ目	ムネカクトビケラ科	1
		エグリトビケラ科	1
		ホソバトビケラ科	1
	ハエ目	ユスリカ科	5
		アブ科	1
		フサカ科	1
	コウチュウ目	ゲンゴロウ科	3
		コガシラミズムシ科	1
		マルハナノミ科	1
6綱13目28科35分類群			

表(2)-8 底生動物の摂食方法による分類（摂食機能群）

摂食機能群	説明
破碎食者	1mm以上の大きな葉、枝などの粗状有機物を餌とする種
採集食者	1mm以下の微細粒状有機物を餌とする種。採集方法によって2タイプに分けられる <ul style="list-style-type: none"> ・濾過採集食者：水中に懸濁している有機物を網で濾し取って食べる種。 ・堆積物採集食者：淵や岩かげに沈殿している有機物を拾って食べる種。
刈り取り食者	石の表面に付着する藻類を剥がして、或いは刈り取って食べる種
捕食者	他の底生動物を餌とする種

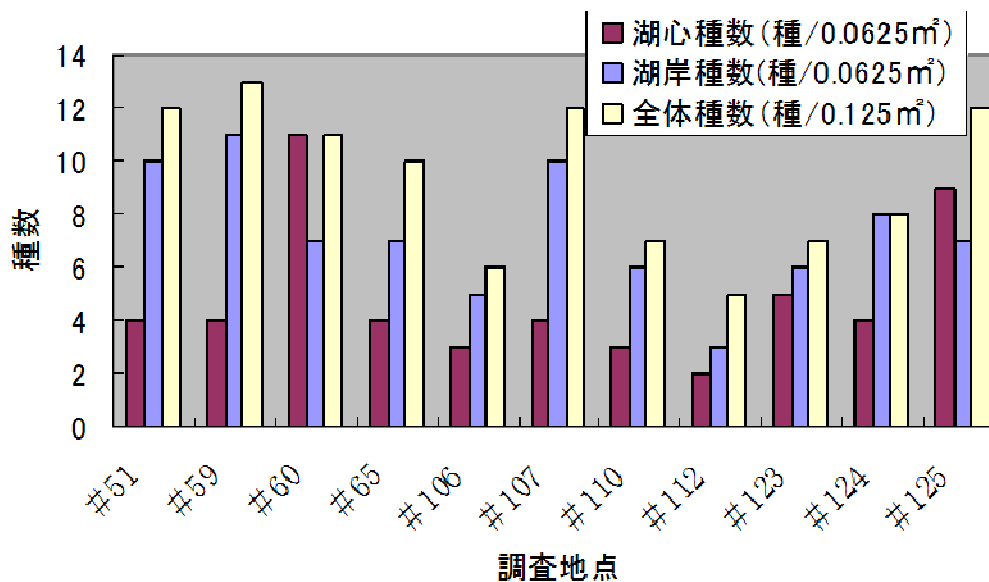
表(2)-9 形態的特徴と微生物環境との対応関係によって区分した6つの生活型

生息場所	生活型	運動方法・営造物	主な種類
主に瀬で優占	造網型	自分の分泌した絹糸を用いて巣の前面に捕獲網を造る。	シマトビケラ科、ヒゲナガカワトビケラ科など
	固着型	強力な吸盤或いは鉤爪によって岩石上に固着する。	アミ科、フユ科など
	匍匐型	河底の石の間や石面上を歩き廻るものである。	カワガエラ類、ヒラタカゲロウ科、マダラカゲロウ科、ナガレトビケラ科、ヘビトンボ科、トロン科など
主に淵で優占	携巣型	筒巣に入って石間や石面上を移動する。	トビケラ科、エクリトビケラ科、アツバエクリトビケラ科、ニンギョウトビケラ科、カクツトビケラ科など
	遊泳型	移動は歩行よりも遊泳を主とするもの。	コカゲロウ科、イトトンボ科
	掘潜型	河底の砂や泥の中に潜って生活するもの。	モンカゲロウ科、トンボ科、ササトンボ科など

3) 種数、個体数、湿重量

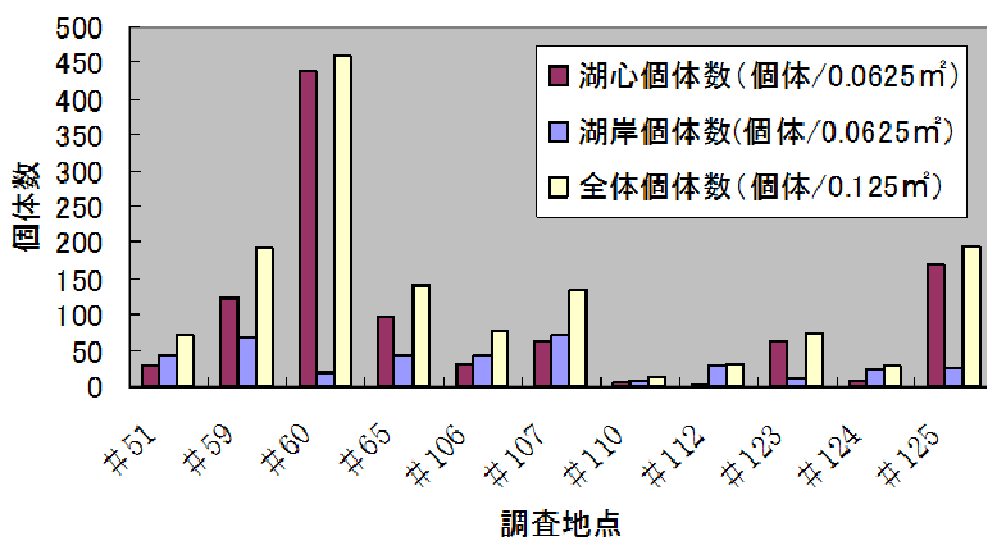
本調査における各湖沼の湖心、湖岸、各湖沼全体の種数、個体数、湿重量は図(2)-8、9、10に示すとおりである。

種数の結果をみると、#60と#125を除く全ての湖沼において、湖岸が湖心を上回った。各湖沼で確認された種数はいずれも13種以下であった。



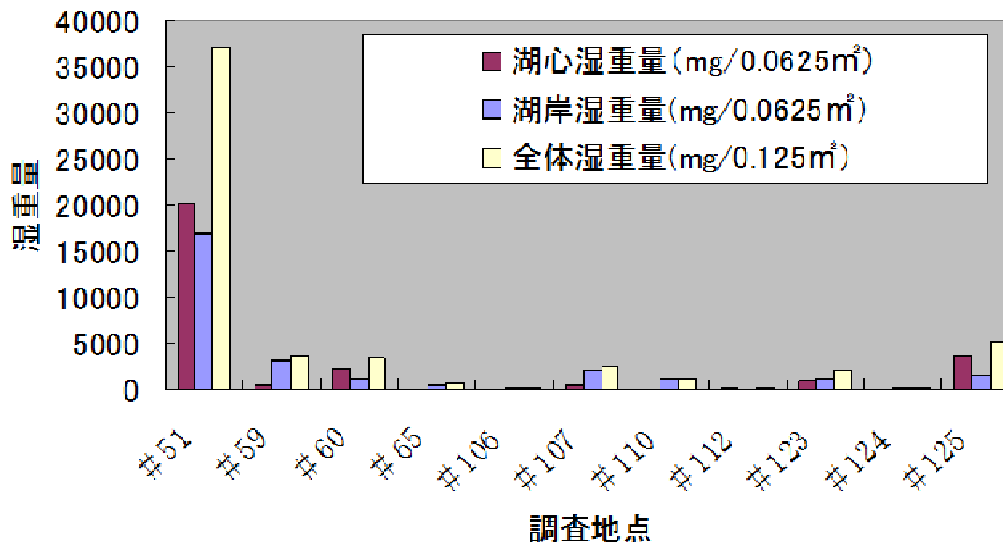
図(2)-8 湖心湖岸別の各試料あたり、および湖沼あたりの出現種数

個体数の結果をみると、湖心が湖岸より個体数が多い湖沼は#59、#60、#65、#123と#125であり、その他の湖沼では湖心が湖岸より少なかった。各湖沼で採集された総個体数は、#60が460個/0.125m²で最も多かった。一方#110が13個体/0.125m²で最も少なく、湖沼間に大きな差が生じていた。



図(2)-9 湖心湖岸別の各試料あたり、および湖沼あたりの出現個体数

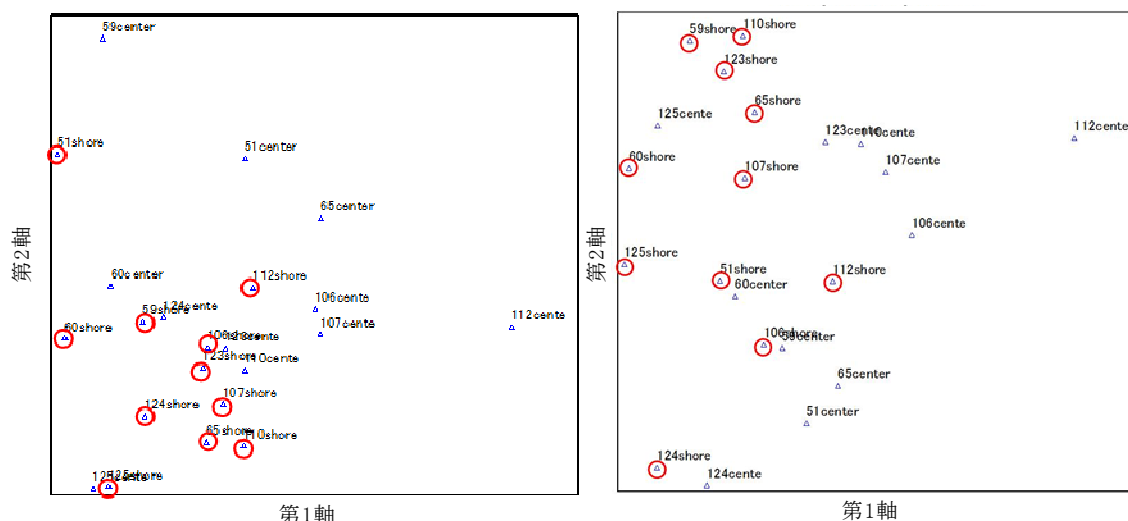
湿重量の結果をみると、湖岸より湖心で多いのは#51、#60、#112、#125であり、その他の湖沼では湖心より湖岸の方が多かった。各湖沼の総湿重量は#51が36979.9mg/0.125m²で最も高く、#106が181.1mg/0.125 m²で最も少なく、湖沼間に大きな差がみられた。



図(2)-10 湖心湖岸別の各試料あたり、および湖沼あたりの湿重量 (mg/採集面積)

4) 湖岸および湖心群集の相違

各湖沼の種組成から湖岸と湖心の違いをみるため、各湖沼の湖岸と湖心の群集を別々の群集として解析した結果を図(2)-11に示した。全体的に湖心 (center) と湖岸 (shore) の群集は異なるという傾向がみられた。



図(2)-11 湖心および湖岸の底生動物群集の構造 (除歪対応分析結果) (左) 科レベルで集計した湿重量 (左図) と個体数 (右図) についての結果を示す。赤丸で囲んでいるのが湖岸から得た試料。

各湖沼の特徴を捉えるために、湖心と湖岸のデータを合計し、さらに各目レベルで合計した結果を表(2)-10に示した。出現種の組成からこれらの湖沼は、以下の3つのグループに分けられた。

第1グループ：#51、#125が該当。ハエ目、トンボ目、カメムシ目、トビケラ目、無吻蛭目、ヨコエビ目、マルスダレガイ目の出現によって特徴づけられた。

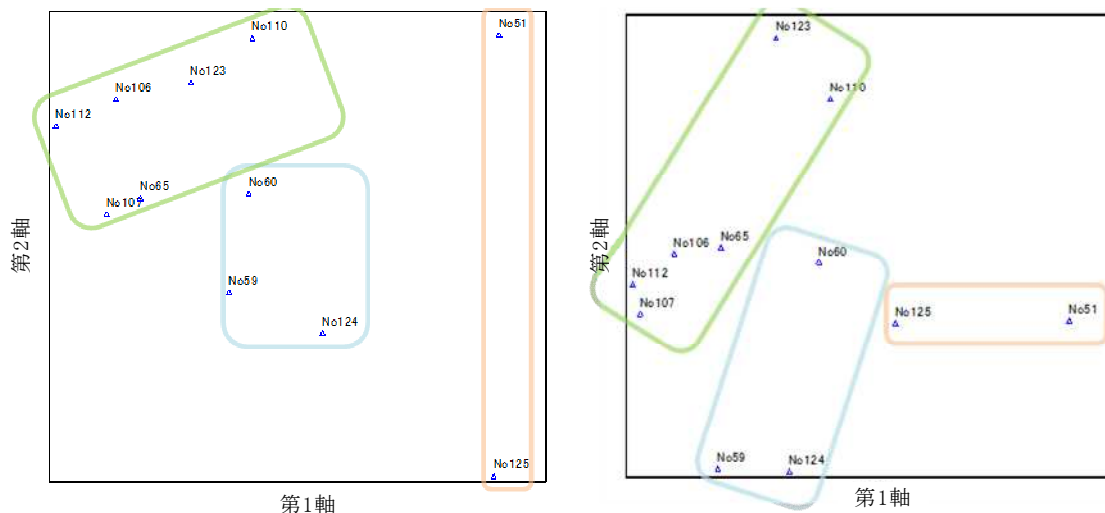
第2グループ：#59、#60、#124が該当。ハエ目、トンボ目、カメムシ目、トビケラ目の種の出現と、無吻蛭目、ヨコエビ目、マルスダレガイ目が出現しないことによって特徴づけられた。

第3グループ：#65、#106、#107、#110、#112、#123が該当。ハエ目、トンボ目の種が出現し、その他の分類群が少ないことで特徴づけられた。

このグループ区分は、個体数および湿重量データを用いて行った除歪対応分析の結果からも概ね指示された(図(2)-12)。

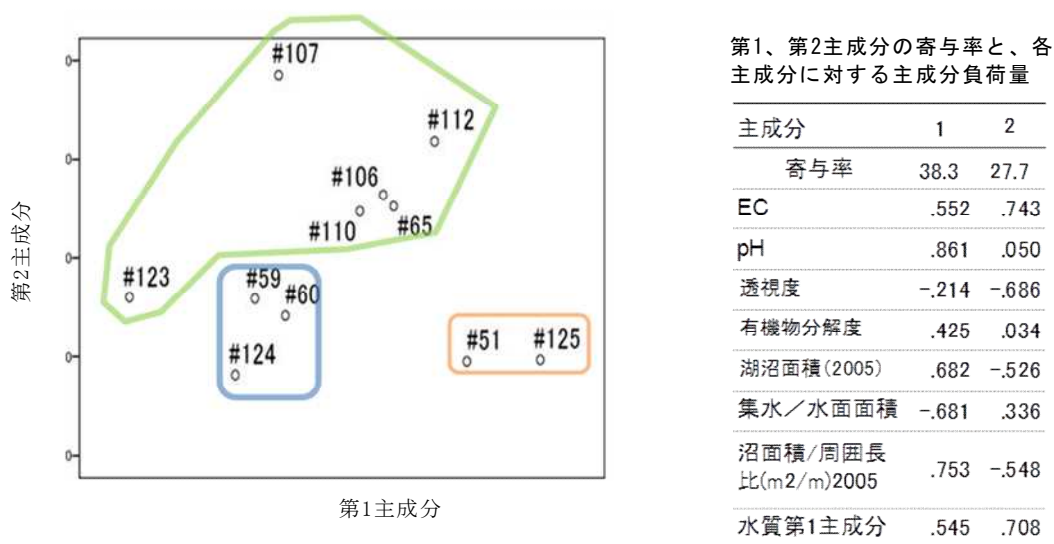
表(2)-10 湖沼ごとの出現分類群(目レベル) 表中の数値は各湖沼で採集された各目の合計個体数である。

目和名	目学名	#106	#112	#110	#123	#65	#107	#124	#59	#60	#125	#51
ハエ目(双翅目)	Diptera	71	26	4	58	129	112	15	128	420	10	52
トンボ目(蜻蛉目)	Odonata	5	3	7	13	6	17	4	46	24	7	
カメムシ目(半翅目)	Hemiptera					2	2	1	2	4	6	1
トビケラ目(毛翅目)	Trichoptera							9	13	4	8	3
無吻蛭目	Arhynchobdellida			1	3					6	2	2
ヨコエビ目	Amphipoda										159	5
マルスダレガイ目	Veneroida										2	2
原始紐舌目	Architaenioglossa											6
基眼目	Basommatophora			1								1
イトミミズ目	Tubificida					4	2			2		
ワラジムシ目	Isopoda				1							
ヘビトンボ目	Megaloptera							1	1		1	
コウチュウ目(鞘翅目)	Coleoptera	1	3				2		2			



図(2)-12 湖沼ごとの出現分類群データの除歪対応分析結果 目レベルで集計した個体数(左図)と湿重量(右図)についての結果を示す。

各湖沼の立地環境データを用いた主成分分析の結果を図(2)-13に示した。立地環境における第1主成分はpHと湖沼面積/周囲長の寄与が大きく、第2主成分はEC、透視度、無機イオンの第1主成分(図(2)-13の水質第1主成分)の寄与が大きかった。なお、水質第1主成分(無機イオンデータのみを用いた主成分分析によって得られた第1主成分)は、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の寄与が大きかったことから、風送塩の影響を示していると考えられた。調査した11湖沼はDCAによる分析結果と同様に概ね3グループに分けられた。



図(2)-13 立地環境の主成分分析結果 水質第1主成分は、無機イオンデータのみを用いた主成分分析によって得られた第1主成分である。

5) 考察

今回の調査の結果、全部で6綱13目28科35分類群の底生動物が確認された。これらの種の殆どは止水環境を好む種であり、本調査地域の湖沼群の環境を反映している。摂食機能群をみると湖沼の止水環境を好むトンボ目、カメムシ目、ヘビトンボ目、コウチュウ目の種が多く採集された。これらの目に属する種の殆どは捕食者である(Merritt and Cummins 1996)⁵⁾。生活型をみると、昆虫綱コウチュウ目、カメムシ目、腹足綱、ヒル綱、軟甲綱の種が多く確認され、遊泳型と匍匐型の2生活型の種が多くを占めた。

本調査を実施した11湖沼は、底生動物群集と立地環境から以下の3グループに分けられた。

- ・第1グループ： #51と#125
- ・第2グループ： #59、#60、#124
- ・第3グループ： #65、#106、#107、#110、#112、#123

先行研究(橘ほか2002)⁶⁾では、本調査地を含む周辺の湖沼群の水質データから、本湖沼群は湖沼と高層湿原が同所的に存在していることを指摘し、同時に解析した湖沼の水質データも公開されている。本調査では橘ほか(2002)⁶⁾で栄養状態の指標とされた全磷と全窒素の濃度を計測しなかったが、水質分析結果、立地環境、植生などから各グループの特徴は以下のようにまとめられる。

- ・第1グループの#51と#125は開放水面が広く、底質が砂質と有機物で、pHが5.3と5.7、ECが17.6mS/mと14.5mS/mであり、本グループは湿原というよりは湖沼の特徴があるものと推察される。
- ・第2グループの#59、#60と#124は開放水面面積が中間的、湖心に抽水植物がないか少なく、有機物底で、pHが4.2~4.5、ECが2.8~9.4mS/mであり、陽イオンNa⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の濃度が低く、高層湿原と中間湿原の中間段階に属すると推定される。
- ・第3グループの#65、#106、#107、#110、#112、#123は開放水面面積が一樣ではなく、湖心に抽水植物が発達していた。有機物底で、pHが4.2~5.7、ECが15.9~27.2mS/mであり、陽イオンNa⁺、Ca²⁺、Mg²⁺の濃度が高く、湖沼から低層湿原に属すると推定された。

第3グループの#123は、主成分分析結果からは、むしろ第2グループに近い特徴があった。一方植生の面では、#123は、第2グループの湖沼とは異なり、コウホネが一面を覆うほど優占していた。#123の底生動物群集の組成には、このような植生の特徴が影響を与えている可能性がある。今回の調査では、植生タイプを注視して採集していないため、植生が底生動物の種類にどのような影響があるのか、今後、詳細に調査する必要があると考えられる。

北海道の湿原の底生動物相に関する調査・研究は今のところあまり多くない。水上成虫による調査は勇払湿原のトビケラ相(久原ほか 2000)⁷⁾についてと、釧路湿原(伊藤ほか 2007)⁸⁾で行われた例があり、水中幼虫・成虫の調査は釧路湿原の塘路湖とシラルトロ湖(伊藤ほか 2002)⁹⁾、釧路湿原達古武沼(伊藤ほか 2005)¹⁰⁾、東部当幌湿原(宮口ほか 2008)¹¹⁾の3事例があるのみと考えられる。今回の調査で確認された6綱13目28科35分類群を、その他の3事例調査の結果と合わせて表(2)-11に示す。釧路湿原の塘路湖とシラルトロ湖(伊藤ほか 2002)⁹⁾ではユスリカ科を除いた種数は僅かに9種であるが、釧路湿原達古武沼(伊藤ほか 2005)¹⁰⁾は96種、東部当幌湿原(宮口ほか 2008)¹¹⁾では83種確認されている。これらの調査はいずれも幼虫採集による確認であるが、釧路湿原の塘路湖とシラルトロ湖の調査方法は15cm×15cmのエグマンバージを用いて漁船の上から1~4回の採集を行っている(伊藤ほか 2002)⁹⁾。一方釧路湿原達古武沼の調査方法は直径20cm、高さ30cmのステンレス製の筒型採泥器、D字型手網を用いており、全て魚類調査時に採集している(伊藤ほか 2005)¹⁰⁾。さらにここでは水生植物のセンニンモ、ヒシ、マツモ、ホザキノフサモを種毎にも採集していた(伊藤ほか 2005)¹⁰⁾。東部当幌湿原ではサーバーネットで3回×2季(25cm×25cm)、あるいはカニかごやタモ網を用いて採集している(宮口ほか 2008)¹¹⁾。この様に調査時に採集した面積や回数などが大きく異なることが、種類数が大きく異なっていた原因の1つと考えられる。釧路湿原達古武沼の調査では、水生植物からのみ採集された種は15種に上る(伊藤ほか 2005)¹⁰⁾。今回の調査では、各湖沼の湖岸と湖心の水生植物の成育状態は様々であったこと、さらに底生動物採集の際になるべく植物を避けるように実施したことも、今回確認された底生動物相に影響を与えていたことが推測される。

これまでに、北海道の湿原における底生動物調査の際に、湖岸と湖心を分けた事例はあまりなかったが、湿原の底生動物相を明らかにするためには、沿岸部を重点的に調べるのが有効であることが宮床湿原における事例で指摘されている(岩熊 1995)¹²⁾。本調査では、多くの湖沼において湖岸で確認された種類数が湖心よりも多かった。その理由としては、湖岸域に発達する水草群落は底生動物に基質や捕食者からのシェルターを提供し(Ward 1992)¹³⁾、底生動物の多様性、密度及び現存量を増加させたことが考えられる(Palomarki and Hellsten 1996)¹⁴⁾。その一方、

表(2)-11 文献から得た北海道の湿原・湖沼における底生動物相（種数）
 釧路湿原の塘路湖とシラルトロ湖（伊藤ほか 2002）⁹⁾、達古武沼（伊藤ほか
 2005）¹⁰⁾、および当幌川湿原（宮口 2008）¹¹⁾での調査結果をもとに作成。

綱	目	科	今回	伊藤他 2002	伊藤他 2005	宮口他 2008	
線虫綱				1	1	1	
腹足綱	原始紐舌目	タニシ科	2		1		
	基眼目	ヒラマキガイ科	1		1	2	
		モノアラガイ科			1	1	
	盤足目	ミズツボ科				1	
二枚貝綱	ミズシタダミ目	ミズシタダミ科			2		
	マルスダレガイ目	マメシジミ科	1			1	
		ドブシジミ科			1		
	イシガイ目	イシガイ科			2		
ミミズ綱	イトミミズ目	イトミミズ科	1	2	7	2	
		ミズミミズ科		1	10	2	
	ナガミミズ目			1	2		
	オヨギミミズ目	オヨギミミズ科			1	1	
	ツリミミズ目	ツリミミズ科			1		
ヒル綱	無吻蛭目	ヒルド科	1	1			
		イシビル科	1		1	1	
	吻蛭目	グロシフォニ科			4	1	
軟甲綱	ヨロエビ目	キタヨロエビ科	1		1	1	
	ワラジムシ目	ミズムシ科	1		1	1	
		コツブムシ科			1		
	ケンミジンコ目	ケンミジンコ科				6	
	ソコミジンコ目					2	
	エビ目	ザリガニ科				1	
		イワカニ科				1	
テナガエビ科				1	1		
アミ目	アミ科			1			
クモ綱	ダニ目	ヌマダニ科			1	1	
		カイダニ科			1	1	
		ツチダニ科				1	
		マルハラダニ科				1	
昆虫綱	カゲロウ目	ヒメシロカゲロウ科		1	1		
		フタオカゲロウ科				1	
	トンボ目	アオイトトンボ科	1				
		イトトンボ科	1		4		
		ヤンマ科	1			1	
		エゾトンボ科	1		1		
		サナエトンボ科	1				
		トンボ科	1		2	2	
	カワゲラ目	オナシカワゲラ科				1	
	カメムシ目	アメンボ科	1		1	2	
		ミズムシ科	1		2		
		コオイムシ科	1		1		
		マツモムシ科	1			1	
		ダイコウチ科			1		
	ヘビトンボ目	センブリ科	1		1	1	
	トビケラ目	ムネカクトビケラ科	1				
		エグリトビケラ科	1			3	
		ホソバトビケラ科	1			1	
		トビケラ科				1	
		ヒゲナガトビケラ科			2		
		ヒメトビケラ科			2		
	チョウ目	セセリチョウ科				1	
	ハエ目	ユスリカ科	5	未公開	34	15	
		アブ科	1	1			
		フサカ科	1	1			
		ヌカカ科		1	2	3	
		ガガンボ科				2	
		ホソカ科				1	
		カ科				3	
		タマバエ科				1	
		クロバネキノコバエ科				1	
		コウチュウ目	ゲンゴロウ科	3		1	4
	コガシラミズムシ科		1				
	マルハナノミ科		1			1	
	ガムシ科					3	
	ホタル科					1	
	ハムシ科				1		
	合計種数			35	9(ユスリカ除く)	96	83

沿岸域で生じる波による攪乱は底生動物の密度及び現存量を著しく低下させることも知られている (Smith and Sinclair 1972)¹⁵⁾。このような湖岸域のモザイク状の構造は底生動物群集の構造を多く変動させることになることから (Rasmussen 1988)¹⁶⁾、今後、湖岸の複雑さや波に注目した底生動物相の把握が課題となる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ チマキザサの地下部を含めたフェノロジーの把握は、今後、ササ群落と環境要因との関係を解析する際の基本的情報として活用が期待される。
- ・ 稚咲内砂丘間湿地・湖沼群の植生や底生動物群集の記載は、今後稚咲内砂丘間湿地や湖沼群の変化や劣化を評価する際の基本情報となる。
- ・ 植物群落を規定する要因として水位が重要であるという結果は、既存研究結果と同様であるが、湖沼水位の低下が、湖沼・湖岸植生に及ぼす影響を模式化した点が新しい。
- ・ 研究例が少ない泥炭地の湖沼における底生動物群集に関して、3タイプの群集が記載されたことは、今後のこの分野の研究に寄与するものである。

(2) 環境政策への貢献

- ・ 本地域の植生を保全管理する上で、水位管理が重要であることを示した。
- ・ 空中写真による湖沼開放水面面積のモニタリングが検知している現象を模式的に示した。
- ・ 湿地の環境に対する指標性が高い、底生動物群集についての基礎的知見の蓄積は、環境指標種の開発に貢献する。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

< 論文 (査読あり) >

- 1) Y. Fujimura, H. Fujita, M. Takada and T. Inoue: Landscape and Ecological Engineering, DOI 10.1007/s11355-011-0159-y (2011)
“Relationship between hydrology and vegetation change from *Sphagnum* lawns to vascular plant *Sasa* communities “
- 2) Y. Fujimura, M. Takada, H. Fujita and T. Inoue: Landscape and Ecological Engineering, DOI: 10.1007/s11355-012-0193-4 (in press)
“Change in distribution of the vascular plant *Sasa palmata* in Sarobetsu Mire between 1977 and 2003”

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない

＜その他誌上発表（査読なし）＞

- 1) 藤村善安、倉博子、富士田裕子：北大植物園研究紀要，11，21-23（2011）
「資料：湿原生植物の葉面積、葉重、葉長の関係」
- 2) 岩熊敏夫：湿地環境と作物－環境と調和した作物生産をめざして－（坂上潤一、中園幹生、島村聡、伊藤治、石澤公明編），養賢堂，1-11（2010）.
「湿地生態系の定義」
- 3) 藤村善安、富士田裕子、水田裕希：北大植物園研究紀要10：1-7（2010）
「サロベツ湿原におけるチマキザサおよびミズゴケのフェノロジー観察結果」

（2）口頭発表（学会等）

- 1) 富士田裕子、井上京、藤村善安：第57回日本生態学会大会（2010）
「サロベツ湿原におけるミズゴケ優占植生の復元実験」
- 2) 藤村善安、水田裕希、富士田裕子：第57回日本生態学会大会（2010）
「北海道北部稚咲内砂丘間湿地・湖沼群の植生の現状」
- 3) 藤村善安、高田雅之、富士田裕子：植生学会第15回大会（2010年）
「サロベツ湿原における高層湿原植生からササ群落への遷移過程の解析」
- 4) 水田祐希、富士田裕子、藤村善安：植生学会第15回大会（2010）
「サロベツ稚咲内砂丘帯における湖沼群植生と土地利用との関係」
- 5) 藤村善安、富士田裕子：日本生態学会第58回全国大会（2011年）
「ササ群落の拡大と湿原植生の地上部バイオマス」
- 6) Y. Fujimura and H. Fujita: Joint Meeting of the 59th Annual Meeting of ESJ and the 5th EAFES International Congress（2012）
“Effects of water level fluctuation pattern on vegetation in sand dune mire complex”

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 湿原生態系 新たな時空間アプローチに向けて（2012年3月19日、龍谷大学瀬田キャンパス）

（5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 地元町民向け講演会：富士田裕子・高橋英紀・井上京・橘治国・岡田操・高田雅之・立木靖之・村元正己. サロベツ学会談話会「サロベツ研究でわかったこと」2009年5月，豊富町共同福祉施設.

8. 引用文献

- 1) 高桑純・伊藤浩司. 1986. 湿原におけるササの生態的動向. 北海道大学大学院環境科学研究科邦文紀要 2: 47-65.
- 2) 上田弘一郎・内村悦三. 1958. ササの生理生態に関する考察. 京都大学農学部演習林報告 27: 112-129.
- 3) Oshima Y. 1961. Ecological studies of *Sasa* communities II. Seasonal variations of productive structure and annual net production in *Sasa* communities. Botanical Magazine of Tokyo 74: 280-290.
- 4) Harley, P. C., Tenhunen, J. D., Murray, K. J. & Beyers, J. 1989. Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra *Sphagnum* mosses from the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska. Oecologia 79: 251-259.
- 5) Merritt R. W. and Cummins K. W. 1996. An Introduction to the Aquatic Insects of North America, Kendall/Hunt Publishin Company. 862pp.
- 6) 橋治国・堀内晃・Rofiq Iqbal・大野浩一. 2002. 地下水水質からみた湿原の涵養機構と保全—湖沼から高層湿原への遷移—. 水環境学会誌 12: 641-646.
- 7) 久原直利・伊藤富子・大川あゆ子. 2000. 北海道勇払湿原のトビケラ相、兵庫陸水生物 51-52: 243-265.
- 8) 伊藤富子・伊藤政和・小杉時規側・大川あゆ子. 2007. 北海道釧路湿原、特に達古武沼のトビケラ相. 陸水生物学報68: 145-156.
- 9) 伊藤富子・大高明史・福原晴夫・伊藤哲也・Jihua Wu・三上英敏・石川靖・五十嵐聖貴・永洞真一郎・高野敬志・安富亮平. 2002. 北海道釧路湿原、塘路湖とシラルトロ湖の底生動物. 陸水生物学報 17: 17-24.
- 10) 伊藤富子・大高明史・上野隆平・栗原康裕・生方秀紀・堀繁久・伊藤哲也・蛭田真一・松本典子・北岡茂男・富樫繁春・若菜勇・大川あゆ子. 2005. 釧路湿原達古武沼の水生大型無脊椎動物相. 陸水学雑誌 66: 117-128.
- 11) 宮口英夫・勝浦雅士・山本龍太・平林貴志・伴修平・戸田龍樹・山本英夫. 2008. 北海道東部当幌川湿原における水生無脊椎動物相. 陸水学雑誌 9: 143-153.
- 12) 岩熊敏夫. 1995. 宮床湿原の底生動物相. 国立環境研究所研究報告 134: 109-120.
- 13) Ward, J. W. 1992. Aquatic insect ecology 1. Biology and habitat. Wiley, New York.
- 14) Palomarki, R. and Hellsten, S. 1996. Littoral macrozoobenthos biomass in a continuous habitat series. Hydrobiologia 339: 85-92.
- 15) Smith, I. R. and Sinclair, I. J. 1972. Deep-water waves in lake. Freshwater Biology 9: 387-399.
- 16) Rasmussen, J. B. 1988. Littoral zoobenthic biomass in lakes, and its relationship to physical, chemical, and trophic factors. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 45: 1436-1447.

(3) 湿原と湖沼群をめぐる水循環機構の解明・モデル化とモニタリング必要情報の抽出

北海道大学大学院農学研究院

井上 京

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所

土原 健雄・吉本 周平

株式会社水工リサーチ

岡田 操

平成21～23年度累計予算額：13,313千円

(うち、平成23年度予算額：4,553千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 湿原と湖沼における水循環機構を、流域の河川や地下水との関係も含めて明らかにすることを目的として、複数の環境同位体を中心とした水質指標、流量観測、水位・水温測定を実施した。結果以下の事が示された。湖水の酸素・水素安定同位体比は、湖水が蒸発の影響を受けて濃縮されていることを示すとともに、動的同位体分別を考慮した同位体収支式から降水に対する湖水の蒸発損失の割合を45.1%と推定した。また、実測値に整合する熱収支シミュレーション結果が得られ、そこから求めた蒸発熱総量からも蒸発損失は約40%と推定された。放射性同位体であるラドンが検出されないことから湖水への地下水流入が存在しないことが示されるとともに、現地に設置した観測孔での水位回復試験によって算定された透水係数から、湖水は泥炭層を受け皿のようにして保持されていることが推察された。湖沼群には地表流出入が存在しないことから、降水を主な供給源とする閉鎖性湖沼であることが明らかになった。さらに、砂丘列帯内の地下水流動は、砂丘列帯を縦断する方向よりも横断する方向へ卓越しており、沿岸農地側の地下水管理が湖沼群の水文環境保全に重要であることが示唆された。湿原および砂丘帯湖沼群からの流路を通じた流出率は、流域の状況によって異なるが21-43%と推定された。

[キーワード] 蒸発、地下水流動、環境同位体、流量観測、熱収支

1. はじめに

湿原や湖沼の生態系を最も特徴づけ、その性状を支配しているのは水文環境である。その水収支を構成するのは、インプットとしては降雨、地表流入、地下水流入、アウトプットとして蒸発散、地表流出、地下浸透であり、それらを理解することが水文環境の理解に不可欠である。多くの場合、湖沼・湿地における地下水の流出入測定の高難しさから、地下水は地表水の水収支の残差としてブラックボックス化して扱われてきた経緯がある。それに対して、地下水の動態を理解する方法として、環境同位体や水質を指標とする手法、あるいは物理探査や数値解析などの手法が取られてきたが、地下水の流出入の複雑な泥炭地では事例に乏しく、また有効なモニタリング手法は確立されていないのが現状である。地表水についても、泥炭地の場合には明確な流路が存在しないために地表流出量の観測も通常困難な状況にある。また、湖沼からの蒸発散量も正確な観測には多くの労力や装置が必要とされ、簡便な観測法が求められている。

2. 研究開発目的

このサブテーマでは、湿原や湖沼の水収支解明に向けて、以下の目的を設定した。

(1) 湿原および湖沼群における流路を通じた流出量の解明

サロベツ湿原と稚咲内砂丘林帯湖沼群の小河川や流路において流出特性調査を実施し、湿原と湖沼の水収支解析を行うことにより、湿原や砂丘林帯湖沼群における流路を通じた流出の役割と重要性を明らかにする。

(2) 環境同位体による地下水・地表水交流特性の影響解明

稚咲内沿岸湖沼群を対象に、複数の環境同位体を中心とした水質指標を用いた調査を実施し、湿地環境における地表水と地下水の交流特性を明らかにすることで、モニタリングに必要な情報を抽出することを目的とする。具体的には、対象湖沼群、広域の地表水、地下水の環境同位体（放射性同位体ラドン、水素・酸素安定同位体比）の分布を明らかにして湖沼群における水の出入を検討する。また、水理地質の検討や地下水位の観測によって地下水の動水勾配や帯水層の透水性を推定し、湖沼群の地下水流動系における位置付けを明らかにする。

(3) 熱収支を利用した水収支の推定

直接観測することが難しい地下水の流出入量や蒸発量を、水の蒸発熱が大きいことを利用して、熱収支を明らかにすることで間接的に推定する。

3. 研究開発方法

(1) 湿原および湖沼群における流路を通じた流出量の解明

サロベツ湿原では、湿原内に存在する2つの流路、落合沼旧水路（以下、落合沼）と、湿原横断道路（道道444号線）南側側溝（以下、道路側溝）において連続的な流量観測を行い、流出量を把握した。両流域とも流域の大半は湿原で占められるが、道路側溝流域は上流部の一部に林地と農地等を含んでいる。落合沼流域の面積は31.7ha、道路側溝流域の面積は165.1haである。

稚咲内砂丘林帯湖沼群では5箇所の小流域を設定し、それぞれの下流端で流出量を把握した。5流域は農業的土地利用を含む2流域（農A、農B）と、人為的土地利用のほとんどない林地流域を3流域（林A、林B、林C）設定した。流域面積はそれぞれ、79.9ha、51.6ha、57.2ha、13.6ha、112.8haである。

流域面積の算出は基本的に2004年に環境省がレーザープロファイラー計測に基づいて取得した数値標高モデル（DEM）を用いた。林Aと林Cの一部の流域界の確定は空中写真の判読や現地踏査によった。

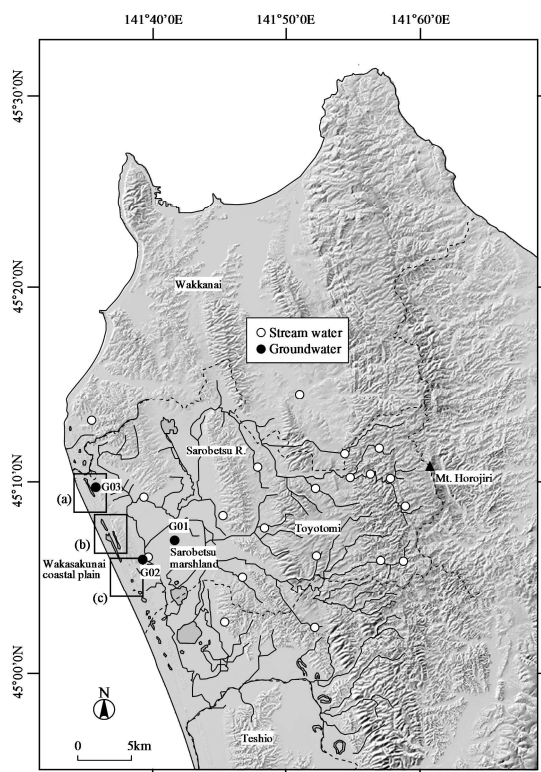
すべての観測点（流域最下流点）において、流路・河川の水位を10分間隔で連続測定し、これをH-Q曲線によって流量に変換した。H-Q曲線を求めるための流量観測には、堰を用いる方法と、流速計による方法を地点によって使い分けた。道路側溝と林Aは堰が設置できなかったため流速計による流量観測を行い、その他の地点では堰による方法を取った。道路側溝観測点と林A流域観測点の近傍では転倒マス式雨量計を設置し、降雨量の観測も同時に行った。林Cの流量観測を除く全ての水文観測は、2010年と2011年の2カ年、実施した。林Cの流量観測は2011年のみ実施した。

(2) 環境同位体による地下水・地表水交流特性の影響解明

1) 調査地概要

本研究では、サロベツ原野西部に位置する稚咲内海岸平野の沿岸湖沼群を対象としている(図(3)-1)。湖沼群は、海岸線に平行して帯状に存在する沿岸砂丘・砂堤列の間に、湿地を伴って発達している。ここでは、砂丘・砂堤間湿地も含めて砂丘列と記載する。砂丘列帯の東側は豊徳台地であり、砂丘列帯と西向き海食崖と接している。豊徳台地の標高は60mを越えるのに対し、多くの湖沼は標高10~15m 前後に位置する。ただし、豊徳台地より南側では砂丘の連続性が悪く、砂丘の尾根と凹地との比高も小さくなり、砂丘帯の区分は不明瞭である。本地域における2009年の年間降水量は955mm、平均気温は6.3℃である(いずれもAMeDAS豊富観測所)。

本地域の地質層序を表(3)-1に示す。サロベツ原野北西部の丘陵では更別層中の被圧地下水を対象とした自噴井が掘削されている。更別層中に被圧帯水層が分布するということは、兜沼層(恵北層)以浅の第四紀層との間にキャップロックとなる難透水層が分布することを意味しており、更別層上面が本地域の水理地質基盤を構成している(北海道開発局 1999)¹⁾。更別層最上部の泥岩層は沿岸湖沼群を含めたサロベツ原野地域全域に分布しており、泥岩層は東、北、西の三方から、軸が南に沈降した南北方向の向斜構造に支配される形で、サロベツ原野南方に向かって潜り込んでいる(北海道開発局 1999)¹⁾。



表(3)-1 地質層序(北海道立地下資源調査所(1981)²⁾に加筆)

時代	地質層序	記号	岩質および岩層	
第四紀	完新世	沖積堆積物	Al	礫, 砂, 粘土, 泥炭
		海浜堆積物	Cd	砂
		低位泥炭	Ml	泥炭
		中間泥炭	Mm	泥炭
		高位泥炭	Mh	泥炭
		砂丘	Sd	砂
		豊徳火山灰層	Hv	スコリア, 火山砂, 粘土
		更新世	ワンコの沢軽石層	Wp
兜沼層(恵北層)	Ka		含礫砂, 粘土	
新第三紀	鮮新世	更別層	Sa	泥岩 含礫砂岩

図(3)-1 調査地位置図および広域の採水地点

豊徳台地を構成する基盤は更別層と推定され、地表から浅部にかけては恵北層および利尻火山噴出物である豊徳火山灰層が東傾斜で地形面の傾動とともに存在する(岡ほか 2006)³⁾。産業技術総合研究所が実施したジオスライサーおよびボーリング掘削調査⁴⁾によると、砂丘列帯下の更別

層の上面標高は海側へ緩やかに低下している。更別層の上位を海浜砂層・砂丘砂および低地が離水した後の湿原堆積物（泥炭）が覆っている。また、砂丘列帯における海浜砂層基底の侵食面の違い、海浜砂層の上面高度と完新世の最高海水準との比較、堆積物の¹⁴C年代測定結果から、縄文海退後の過去5,000～6,000年間に稚内海岸平野は明らかに隆起している（産業技術総合研究所2006）⁴⁾。この地震性隆起による相対的な海水準低下に伴い、沿岸側の砂丘列が階段状に高度を下げながら海側に成長している（川上ほか2010）⁵⁾。対象とした湖沼群はこれら砂丘列帯上に発達している。現場透水試験並びに揚水試験より、海浜性堆積物および更別層最上部層の透水係数はそれぞれ 3×10^{-5} m/s、 $5 \times 10^{-7} \sim 5 \times 10^{-8}$ m/sである（北海道開発局1999）¹⁾。

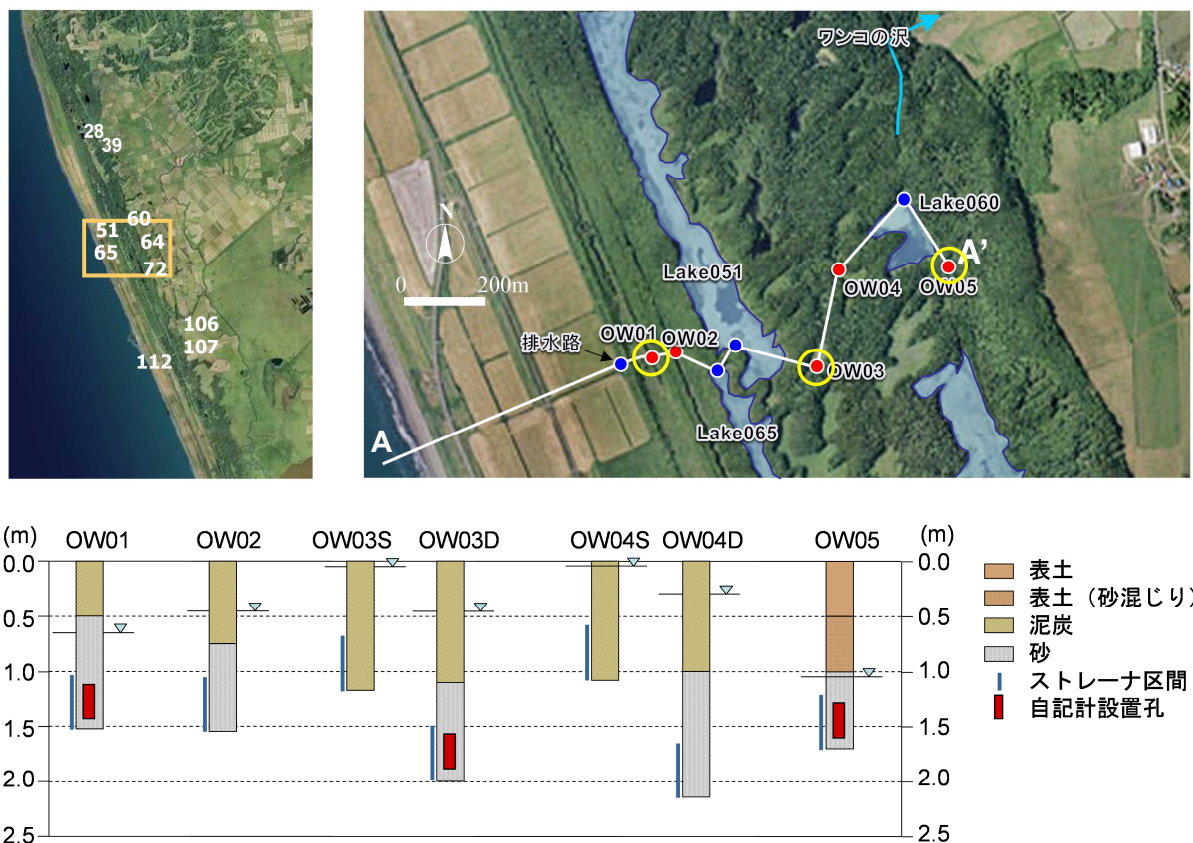
2) 調査地点

本研究では、湖沼群としてLake028、051、060、064、065、072、106、107、112の9湖沼および沢水（図(3)-2）、さらにサロベツ川流域の広域河川水および既存観測孔の地下水（図(3)-1）を対象として水質分析用の採水を行った。採水調査は、2009年8月17～21日、2010年6月15～17日、2011年6月29～30日に実施した。なお、AMeDAS豊富観測所の降水・気温データを検討のために用いた。

2009年8月の調査では、Lake028～072については、湖沼の大きさに応じて50～100mの間隔で格子状となるように湖水を採取した。採水は、ボート上より井戸用採水器を用いて水面下1mの湖水を採取した。Lake106、107、112については開放水面が小さいため、中心付近1点のみの採水を実施した。広域河川水は、異なる標高地点の酸素・水素安定同位体比のデータを取得するために、サロベツ川の支流を中心に採水を行った。また、Lake060近傍の沢水であるワンコの沢の2地点においても採水した。地下水は既存の観測孔から採取し、G01、G02は水面直下、G03はストレーナ設置位置を採水深度とした。採水地点数は、湖沼110、広域河川水20、沢水1、地下水3である。さらに、湖沼の形状を明らかにするために、Lake028、051、060、064、065、072の6湖沼において、湖上より標尺を用いて測深調査を実施した。測深の間隔は湖沼の大きさに応じて25～50mの間隔で格子状となるように実施した。

2010年6月の調査では、10の湖沼（Lake028、039、051、060、064、065、072、106、107、112）で採水した。また、砂丘列帯を横断するように5カ所で7本の観測孔を設置し（図(3)-2）、これらの観測孔で地下水位を測定するとともに地下水試料を採取した。なお、これらの観測孔のうち、OW01、OW03S、OW05に自記水位計を設置して、地下水位および水温の変動の記録を開始した。さらに、観測孔を設置した横断面において湖沼群と農地の間に位置する排水路で、水路に湧出する地下水を採取した（図(3)-2）。

2011年6月の調査では、7つの湖沼（Lake028、051、060、065、106、107、112）と2010年に設置した7本の観測孔、排水路1カ所で採水した。2010年に設置した自記水位計を回収して地下水位および水温の変動データを取得するとともに、観測孔OW03S、OW03S、OW04Dでは水位回復試験を実施して地層の透水係数を算定した。



図(3)-2 地下水と湖水の採取地点および観測孔の地質柱状図（地下水位は2010年6月）

3) 水質分析方法

採取した試料水の分析項目は、水温、電気伝導度（EC）、pH、主要イオン、水素・酸素安定同位体比、放射性同位体のラドン（ ^{222}Rn ）である。EC、pH、水温は現地で採水直後に電気伝導度計およびpH計（横河電機社製または東亜DKK社製）で測定した。主要イオン濃度は、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} についてはイオンクロマトグラフ法（東亜DKK社製、ICA 2000）によって、 HCO_3^- についてはMアルカリ度（pH 4.8酸消費量）としてHCl滴定法によって測定した。

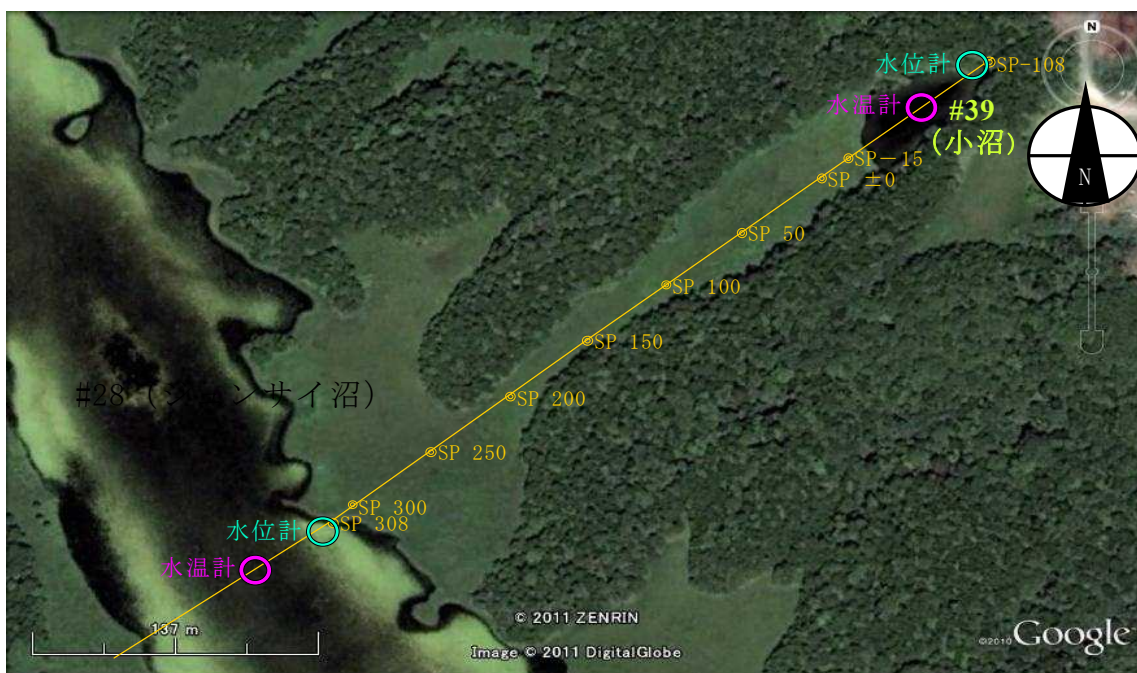
安定同位体比の測定では、試料水を加えたバイアル瓶の気相部分に水素測定では水素ガス、酸素測定では二酸化炭素ガスを添加し、同位体交換平衡の状態になった平衡ガスを測定した。水素は平衡装置付安定同位体比質量分析計（Thermo Fisher Scientific社製、DELTA plus XL）、酸素はGAS BENCH II（Finnigan社製）により平衡ガスを導入し、安定同位体比質量分析計（Thermo Fisher Scientific社製、DELTA V Advantage）で測定した。測定誤差は δD が1‰、 $\delta^{18}\text{O}$ が0.05‰である。

ラドンは帯水層を構成する土粒子に含まれるラジウム（ ^{226}Ra ）の α 崩壊により生成される水溶性の放射性ガスである。ただし、半減期が3.8日と非常に短く、また揮発性であることから、供給源のない地表水にはほとんど含まれず、地下水中には地表水よりも $10^2 \sim 10^3$ 倍高濃度で存在する。これらの特性を利用し、地下水の地表水への漏出の指標とすることが可能である（Ellins et al. 1990; Cook et al. 2003）⁶⁾⁷⁾。ラドンの抽出には、ラドンが水よりもトルエンに溶けやすい性質を利用したトルエン抽出法（濱田ほか 1997）⁸⁾を採用し、抽出した試料を液体シンチレーションカウンタ（Packard社製、2250CA）により測定した。検出限界は0.10Bq/Lである。

(3) 熱収支を利用した水収支の推定

1) 調査地概要と泥炭土壌調査

稚咲内砂丘間湖沼群の中の#28（通称ジュンサイ沼）と#39（通称ジュンサイ小沼）を対象とした。#28は概ね北北西から南南東方向に細長く伸びる湖沼群中最大の面積を有する沼で、#39は#28の東側に位置している。この#28と#39の間は砂丘帯を横断する方向に細長く伸びる湿原となっていることから、砂丘帯を縦断する方向の水の流動は少なく、横断方向の流動を観測するのに適していると考えられる（図(3)-3）。この2つの湖沼を結ぶラインを設け、#39の西側に設けた基準点（SP-0）と基準点から西側に3地点と東側に8地点の合計12地点で、水位計測と土壌貫入試験を行った。土壌貫入試験には、コーンペネトロメーターを用い、深度5cmおきの貫入抵抗値を記録した。また同地点においてピートサンプラーを用いた泥炭の調査を行い、泥炭層基底（砂が採取される層）の深さも記録した。



図(3)-3 ジュンサイ沼（#28）～小沼（#39）断面観測点位置図 SPと数値によって示されているのが調査地点で、正值は基準点から#28方向、負値は#39方向の距離（m）を示す。近接する一部の地点は省略している。

2) 水位・水温観測と気象観測値の収集・整理

#28と#39のそれぞれで、自記水位計と自記温度計を用いて、水位と水温を連続的に観測した（設置地点を図(3)-3に示す）。水位計は湖岸に設置した。温度はアンカー（錨）と浮きを綱で結んで水中に懸垂し、その綱に50cmおきに水温ロガーを固定することで、深度50cmごとの深度別水温を測定した。あらかじめ計測してあった両沼の水深から、#28には3個、#39には5個のロガーを設置した。

3) 熱収支を利用した水収支の推定

まず沼全体の熱収支をシミュレーションによって再現し、さらに水の蒸発熱が大きいことを利用して、再現された熱収支より蒸発量を推定することにした。熱収支を再現するためのモデルとして、実測した水温データと気象庁AMeDASなどから入手した気象データに基づく以下のシミュレーションモデルを構築した。これは、MITモデルをベースにした熱移動多層モデルである。

以下にこのモデルの基礎式を示す。

$$\text{[水温の連続方程式]} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{H}{\rho C_w} \quad \dots\dots (1)$$

左辺第1項は加速度項、2～3項は移流項、右辺第1項は拡散項、第2項は生成・消滅項である。

生成・消滅項の大半は水面近くで起こる現象であり、次式で表せる。

$$\text{[生成・消滅項]} \quad H = R_0 + R_d - R_u - EH - AH + QH_{in} - QH_{out} + GH \quad \dots\dots (2)$$

ここに太陽からの輻射熱 S の一部は水面で反射され、水中に入った光エネルギーの多くは水面近くで吸収され、残りは指数関数的に減衰しながら水中を伝わる。水中に入る光エネルギー R_0 と水深 z における光エネルギー R_z は次式で表される。

[放射熱関係]

$$R_0 = (1 - \alpha)S \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$R_z = (1 - \beta) \times R_0 \cdot \exp(-\eta \cdot z) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで α : 水面反射率、 β : 水面吸収率、 η : 水中減衰率である。

大気・雲からの輻射熱 R_d と湖水からの輻射熱 R_u は以下のスウィンバンクSwinbankの式で求められる。

[スウィンバンクSwinbankの式]

$$R_u - R_d = C_1 (T_{wk}^4 - 0.937 \times 10^{-6} \cdot C_2 \cdot T_{ak}^6) \quad \dots\dots\dots (5)$$

また

$$C_1 = 0.97 \times \sigma, \quad C_2 = 1.0 + 0.17 \times C^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに T_{wk} : 水温の絶対温度(K)、 T_{ak} : 気温の絶対温度(K)、 $C_1 \cdot C_2$: 係数、 σ : Stefan-Boltzmann 定数 ($= 1.3543 \times 10^{-11} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4$)、 C : 雲量である。

蒸発・凝結に伴う潜熱 EH と大気との間の伝導顕熱 AH はローバー-Rohwerの式で表される。

[ローバー-Rohwerの式]

[潜熱]

$$EH = (0.308 \times 10^{-3} + 0.185 \times 10^{-3} W) \times \rho \times (e_w - Hum \cdot e_a) \times (L_v - C_w \cdot T_w) \quad \dots\dots (7)$$

[顕熱]

$$AH = (0.308 \times 10^{-3} + 0.185 \times 10^{-3} W) \times \rho \times 269.1 \times (T_w - T_a) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで W : 風速 (m/s)、 ρ : 水の密度 (kg/m³)、 Hum : 湿度、 e_w : 表面水温に相当する飽和蒸気圧 (mmHG)、 e_a : 気温に相当する飽和蒸気圧 (mmHG)、 L_v : 蒸発の潜熱 (=595.9 kcal/kg)、 C_w : 比熱 (=0.54 kcal/kg・K)、 T_w : 表面水温 (°C)、 T_a : 気温 (°C) である。飽和蒸気圧 $e_w \cdot e_a$ は次式で求める。

$$e_w = 4.58 + 0.3548 \times T_w + 0.007 \times T_w^2 + 0.0003817 \times T_w^3 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$e_a = 4.58 + 0.3548 \times T_a + 0.007 \times T_a^2 + 0.0003817 \times T_a^3 \quad \dots\dots\dots (10)$$

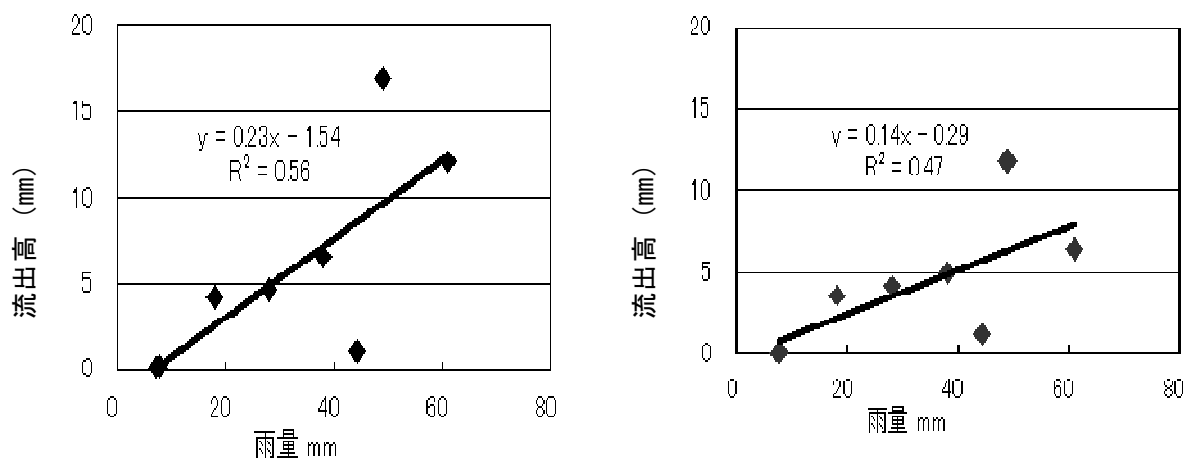
計算にはAMeDAS豊富データ(降水量 mm(豊富)、気温 °C(豊富)、風速 m/s(豊富)、日照時間 hr(豊富))と、稚内の地上気象原簿より得た湿度 %(稚内)、全天日射量 MJ/m²(稚内)、雲量(稚内)を利用し、試行錯誤的に最適境界条件を探索した。この熱収支推算結果に基づき水収支を定量的に推定した。また、得られた結果を、支笏湖での解析事例と比較した。

4. 結果および考察

(1) 湿原および湖沼群における流路を通じた流出量の解明

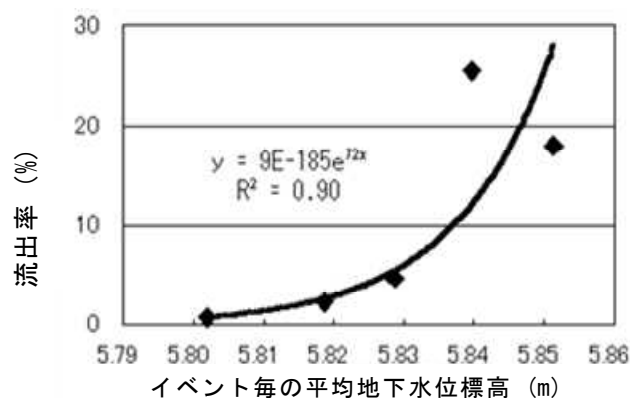
1) サロベツ湿原2流域における観測結果

2010年7～11月における観測結果を示す。この期間全体の流出率(総流出高mm/総雨量333mm)は、落合沼で41%、道路側溝で29%であった。降雨開始から降雨終了24時間後までの期間を一つの降雨イベントとして、生じた8回の降雨イベントについて解析した結果、イベント毎の雨量と流出高の関係が得られた(図(3)-4)。なお流出高は降雨直前に生じていた流量をその逡減傾向をもとに補正し、対象の降雨イベントに対する流出のみ抽出できるようにした。両地点の雨量と流出高の関係には、ばらつきがあるものの有意な関係があった。回帰直線の傾きから、降雨後24時間の流出率は落合沼で23%、道路側溝で14%という値が得られた。



図(3)-4 雨量と流出高の関係 落合沼(左)と道路側溝(右)での解析結果。

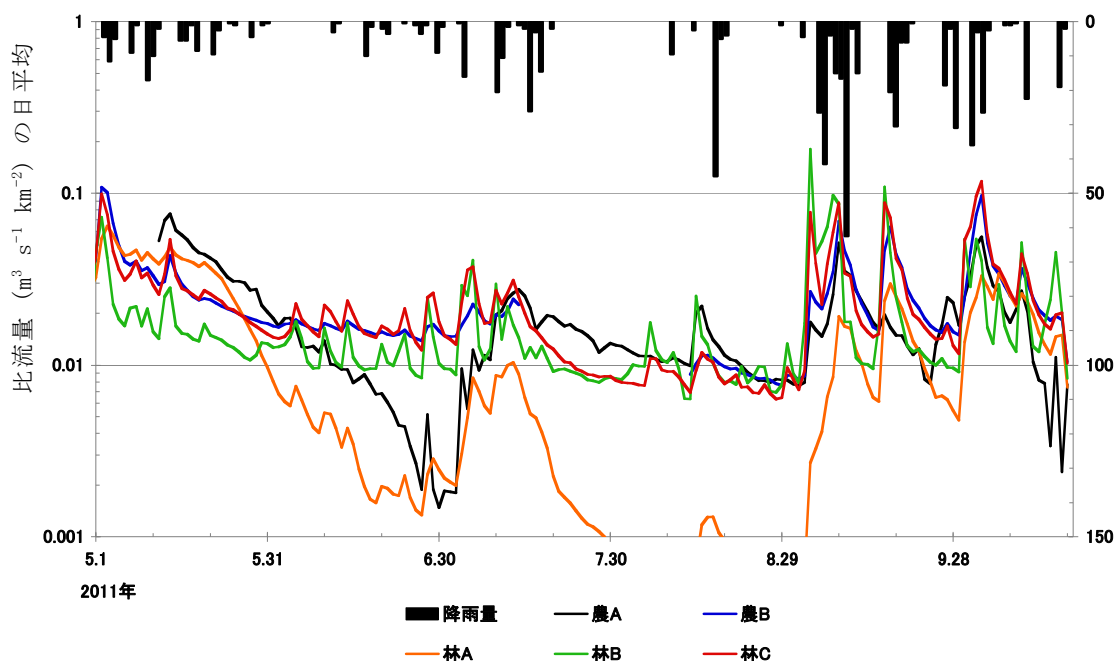
次に降雨開始時の水位と流出率の関係を検討した(図(3)-5)。地下水位が高いほど流出率が大きくなる傾向が見られた。泥炭は表面付近ほど透水係数が大きく、深くなるにつれ小さくなる。したがって、地下水位が低いときの降雨は泥炭層に保持され流出しにくいのに対し、水位が高いときには表面付近の高い透水性により流路に至りやすいと考えられた。



図(3)-5 地下水位と流出率

2) 稚咲内砂丘林帯湖沼群5流域における観測結果

2011年5～11月の観測より、各流域観測点における比流量の日平均を示す(図(3)-6)。同じ期間のデータが揃っている5月12日から10月17日の間(欠測期間の7月15日～8月12日を除く)について、期間流出率は最小21%(林A)、最大43%(林C)であり、やや流域間のばらつきがあった。また期別に流出挙動をみると、各流域には特徴的な流量変動があった。なお、2011年は、7月中旬から8月上旬にかけて長い無降雨期間があったこと、9月以降は多雨傾向に転じ、特に9月の降雨量は過去30年間でも最大であったことが特徴である(AMeDAS豊富データに基づく)。



図(3)-6 稚咲内砂丘林帯湖沼群5流域の比流量比較 (2011年)

農Aは観測期間中の流量変動が大きかった。融雪後5月下旬頃までの間は比較的比流量が大きかったが、その後減少を続けた。ただし7月中旬以降の無降雨期にはさほど流量を減じず、安定していた。同様に流量変動が大きかったのは林Aである。林Aと林Cは共に砂丘林帯湖沼群の複雑な地形を流域に抱えている。このうち林Aは、融雪後の5月中旬頃までは比較的大きな比流量であったのに対し、6月以降は著しく比流量が低下することが多かった。林Aでは豊水期と渇水期で流域面積が10倍程度変化している可能性がある。複雑な凹地地形を上流に有しており、豊水期には流路がつながって流域面積を大きくするのに対し、渇水期には流路が途切れ、流域面積が小さくなるような地形特性となっている可能性が強い。したがって、積雪期から融雪期には流域内貯水量が増加し、流出も大きくなるのに対し、長い無降雨期間を経た後には流域が分断され流出も小さくなったと考えられる。

農Bと林Cは比較的類似した比流量であった。林Cは5流域の中で最も流域面積が大きい。双方の流域とも、融雪後の5月末までは比較的大きな比流量を示した。6月下旬から8月下旬にかけて渇水となり比流量もやや減少したが安定しており、さほど低下しなかった。

一方、最も小さな流域である林Bは、地形的にも起伏に富むことから、応答の良い(変動の激しい)流出を呈した。

(2) 環境同位体による地下水・地表水交流特性の影響解明

1) 湖沼への地下水流入の有無と水質形成

2009年から2011年までの調査で採水された試料のEC、pH、ラドン濃度、主要イオン濃度の平均値を表(3)-2に示す。

ラドンは、帯水層を構成する土粒子に含まれるラジウム (^{226}Ra) の α 崩壊により生成される放

射性の希ガス元素である。ただし、半減期が3.8日と非常に短く、揮発性であることから、供給源のない地表水にはほとんど含まれず、地下水中には地表水よりも高濃度で存在する。広域の観測孔における地下水中のラドン濃度（2009年採水）は、沖積堆積物A1（表(3)-1）中の地下水に相当するG01およびG02で2.05、2.03Bq/L、砂丘砂層Sd（表(3)-1）中に相当するG03で1.84Bq/Lであった。

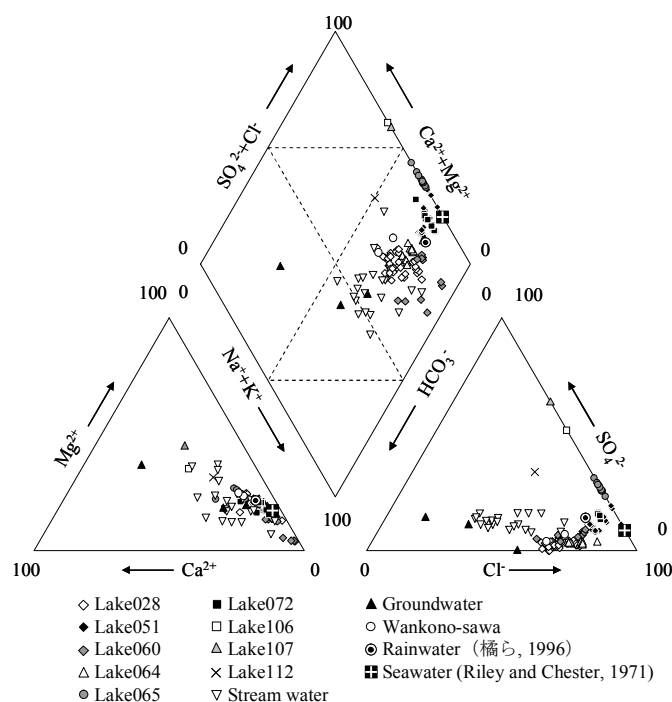
また、砂丘列帯に2010年に設置した観測孔の地下水については、砂層から採取した試料（2010、2011年）のラドン濃度は平均1.59Bq/Lであった。一方、各湖沼のラドン濃度は検出限界以下（ND）であった。また、砂丘列帯を流れるワンコの沢は0.10Bq/Lで、地下水と比較して極めて低い濃度であった。対象とした湖沼群は、地形図および踏査より河川等の地表流出入がないことが確認されている。また、湖水のラドン濃度がNDであることから、湖沼には砂層を流動する地下水の流入はないか、あるいは流入があったとしても極微量で採水時にはラドンは放射能壊変によって既に検出限界以下に減少していたと考えられる。よって、対象とした湖沼群は、降水を主たる供給源とする閉鎖性湖沼であると判断できる。

2009年に採水・測定された湖水、河川水、地下水のトリリニアダイアグラムを図(3)-7に示す。湖水中の主要イオンの組成は、非重炭酸ナトリウム型を示す。橘ら（1996）⁹⁾および堀内ら（1997）¹⁰⁾は、湖沼群の東側のサロベツ原野において降水によって涵養された湿地表層水が、非重炭酸ナトリウム型の水質組成を示すことを報告している。トリリニアダイアグラムにおいて、湖沼群の水質は上述の湿地表層水と同様の領域にプロットされることから、湖沼の水質は湖沼周辺（湖底含む）の泥炭土壌と平衡状態となることで形成されていると考えられる。湖沼群の水質は地下水の水質組成とは異なっており、ラドン濃度から推定された地下水流入のない閉鎖性湖沼という結論と整合的といえる。また、湖水のpHは4.20～6.83で比較的低い。一般に、泥炭土壌は、塩基に飽和されていないカルボキシル基により高い酸性を示す（庄子 1976）¹¹⁾ことから、湿地表層水の影響が湖水に表れているといえる。ただし、湖水のNa⁺/Cl⁻組成比は海水のNa⁺/Cl⁻組成比（= 0.86）に近く（図(3)-8）、風送塩の影響も水質形成に寄与していると考えられる。

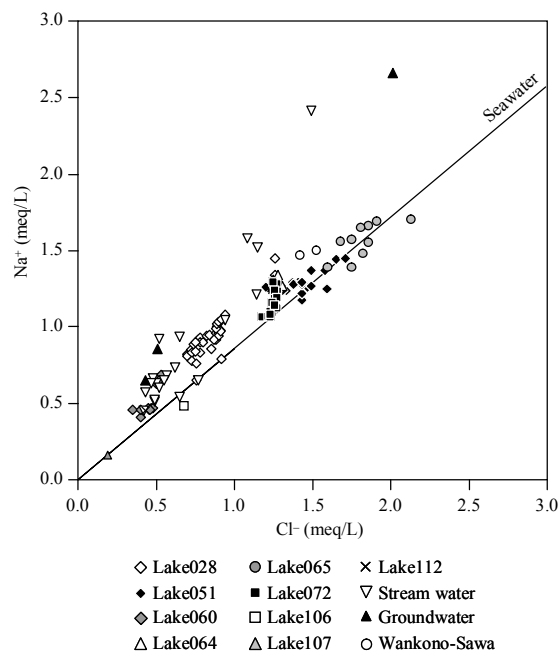
表(3)-2 湖水、地表水、地下水の水質一覧 (平均値)

	Number of sampling points	EC [mS/m]	pH	²²² Rn [Bq/L]	Na ⁺ [mg/L]	K ⁺ [mg/L]	Mg ²⁺ [mg/L]	Ca ²⁺ [mg/L]	HCO ₃ ⁻ [mg/L]	Cl ⁻ [mg/L]	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	NO ₃ ⁻ -N [mg/L]
2009年採水												
Lake028	37	14.95	6.74	ND	21.71	0.60	3.20	2.05	20.93	30.44	1.55	ND
Lake051	20	21.40	5.84	ND	29.62	0.27	4.07	2.38	9.14	50.61	10.12	ND
Lake060	11	7.74	5.49	ND	12.13	0.47	0.76	0.57	8.31	16.35	1.91	ND
Lake064	15	21.02	6.83	ND	29.25	1.52	4.18	1.86	20.32	44.78	2.74	ND
Lake065	10	30.38	4.20	ND	35.93	0.15	7.11	6.14	0.00	64.45	32.06	ND
Lake072	18	20.23	6.12	ND	27.42	1.21	3.76	2.25	9.49	45.11	10.82	ND
Lake106	1	18.14	5.29	ND	11.05	0.95	5.52	6.44	0.00	23.99	35.05	ND
Lake107	1	7.94	5.07	ND	3.67	0.49	2.25	2.21	0.00	6.56	16.55	ND
Lake112	1	11.43	6.58	ND	10.37	0.12	3.43	3.24	12.19	15.25	15.55	ND
広域河川水	20	17.56	7.63	—	20.26	3.05	2.52	5.20	38.11	24.69	7.98	0.12
広域観測孔	3	36.84	6.70	1.97	32.00	1.65	7.83	14.00	93.49	34.90	9.97	ND
ワンの沢	2	27.20	6.85	0.10	33.98	2.92	7.09	5.34	36.58	52.60	5.51	ND
2010年採水												
Lake028	37	143.4	7.23	ND	23.04	1.70	2.17	2.54	13.84	34.35	4.45	ND
Lake051	1	65.9	6.70	ND	10.00	0.57	0.90	1.67	6.10	15.89	3.91	ND
Lake060	1	201.3	6.92	0.11	31.35	1.31	2.93	1.71	12.19	51.46	8.77	ND
Lake064	1	89.4	6.46	ND	12.36	0.96	0.91	1.20	6.10	20.82	3.02	ND
Lake065	1	207.0	7.07	ND	30.75	2.29	3.58	2.54	24.39	52.01	3.81	ND
Lake072	1	290.0	6.45	0.14	44.39	3.57	4.26	3.09	12.19	78.10	14.66	ND
Lake106	1	206.0	6.98	ND	30.60	1.90	3.77	2.38	12.19	51.62	11.25	ND
Lake107	1	173.3	5.99	ND	21.16	1.41	3.33	4.54	6.10	41.72	11.94	ND
Lake112	1	115.1	5.87	ND	12.50	1.22	2.75	2.47	6.10	26.16	6.34	ND
サロベツ川	1	325.0	5.32	ND	46.87	0.49	4.62	6.17	6.10	78.54	21.40	ND
広域観測孔	2	206.4	7.04	ND	26.17	2.89	4.09	6.85	67.07	28.22	6.53	0.54
ワンの沢	2	204.2	6.96	3.79	16.16	1.04	6.28	14.10	76.22	17.54	13.35	ND
新規観測孔	7	268.0	6.99	0.39	35.53	2.27	5.81	6.44	42.68	57.05	6.70	ND
排水路	1	148.7	5.35	1.98	21.06	1.00	2.43	3.18	9.58	28.37	18.72	ND
2011年採水												
Lake028	1	226.0	7.21	ND	20.85	1.52	2.86	1.84	6.10	35.84	4.39	ND
Lake051	1	194.4	6.34	ND	27.79	1.33	3.62	1.49	12.19	48.04	6.86	ND
Lake060	1	96.5	6.90	ND	10.35	0.94	1.08	0.67	6.10	18.27	2.46	ND
Lake065	1	263.0	6.06	ND	38.05	1.09	3.49	1.80	6.10	61.36	9.28	ND
Lake106	1	167.7	7.85	ND	23.01	0.64	2.52	2.16	12.19	38.76	3.90	ND
Lake107	1	324.0	4.70	ND	44.08	1.14	6.08	5.22	N.D.	90.35	10.04	ND
Lake112	1	160.2	5.77	ND	19.40	0.71	1.97	2.17	12.19	34.58	1.89	ND
新規観測孔	7	155.7	5.37	0.58	16.36	2.97	2.22	1.95	6.10	28.90	6.33	ND
排水路	1	175.8	5.67	0.34	22.90	1.88	3.70	2.70	6.10	36.99	15.74	ND

*ND: Not Detectable



図(3)-7 採水試料のトリリニアダイアグラム

図(3)-8 採水試料のNa⁺/Cl⁻組成比

2) 湖水への蒸発の影響と湖沼の形状との関係

広域河川水における平均標高と $\delta^{18}\text{O}$ の関係を図(3)-9に示す。広域河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は $-10.95 \sim -9.46\text{‰}$ の範囲にあり、平均値は -10.28‰ である。ここでは平均標高として、採水地点より上流側の集水域の平均標高を用いている。海岸から本流域内で最も標高の高い幌尻山(427m)までの距離は約30kmであり、流域は緩勾配の地形となっているため、流域内の高度効果は明瞭ではない。しかし、平均標高と $\delta^{18}\text{O}$ は負の相関を示し、沿岸部付近の地表水の $\delta^{18}\text{O}$ は $-10.0 \sim -9.5\text{‰}$ 程度と考えられる。

これに対し、湖水の $\delta^{18}\text{O}$ は高い値を示し、2009年に採水した試料の各湖沼の平均値は -7.71‰

(Lake107) $\sim -5.06\text{‰}$ (Lake051) の範囲にある(表(3)-3)。Lake028を除いた湖沼の $\delta^{18}\text{O}$ の標準偏差は $0.06 \sim 0.22\text{‰}$ である。Lake028については、北側ほど安定同位体比は高く、南側は低い傾向にあり、 $\delta^{18}\text{O}$ は $-8.41 \sim -5.41\text{‰}$ と北側と南側で 3‰ の差がみられた。バラつきは水質でも見られ、Lake028を除く湖沼のECの標準偏差は $0.22 \sim 1.46\text{mS/m}$ であるのに対し、Lake028は標準偏差が 2.15mS/m であった。Lake028は本地域の湖沼群で最大の湖沼であり、他の湖沼に比して湖沼内でのバラつきが相対的に大きいといえる。

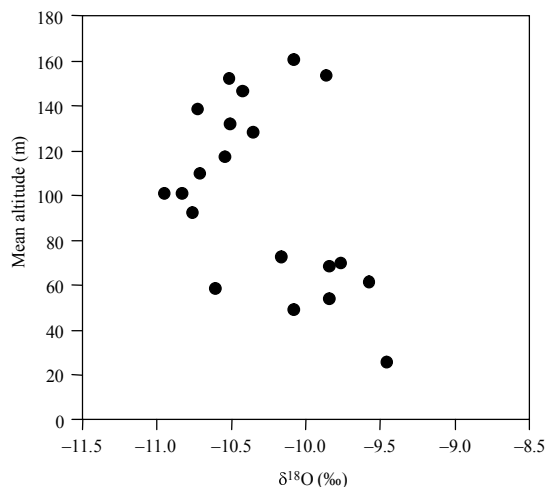
図(3)-9 広域河川水の平均標高と $\delta^{18}\text{O}$ の関係

表 (3)-3 2009 年採水試料の δ¹⁸O および δD

	Number of sampling points	δ ¹⁸ O [‰]		δD [‰]	
		Avg.	SD	Avg.	SD
Lake028	37	-6.46	0.76	-51.57	3.14
Lake051	20	-5.06	0.22	-46.30	0.94
Lake060	11	-5.08	0.09	-44.94	0.84
Lake064	15	-5.47	0.05	-45.66	1.03
Lake065	10	-5.90	0.12	-48.66	1.47
Lake072	18	-6.41	0.06	-50.16	0.78
Lake106	1	-6.57	-	-53.12	-
Lake107	1	-7.71	-	-59.51	-
Lake112	1	-5.29	-	-48.96	-
Stream water	20	-10.28	0.44	-64.72	1.45
Wankono-sawa	2	-10.02	0.00	-62.97	0.20
Groundwater	3	-9.91	0.83	-64.55	7.23

*Avg.: Average, SD: Standard Deviation

図 (3)-10に2009年から2011年までの採水試料の δ¹⁸O- δD ダイアグラムを示す。湖沼群で採水された湖水は、広域河川水、ワノコの沢、地下水とは異なり、天水線 (LMWL、Local Meteoric Water Line) (Matsubaya et al. 1973)¹²⁾の傾きからずれて蒸発線 (LEL、Local Evaporation Line) 上に分布し、その傾きは 3.91である。決定係数R²は0.89であり、湖水の安定同位体比分布は蒸発線の回帰式によって説明可能といえる。したがって、各湖沼の安定同位体比は蒸発に伴う動的同位体分別の影響を受けているといえる。ただし、蒸発の影響は湖沼により異なる。

各湖沼へ供給される降水のうち蒸発により失われる割合 (r) は以下の式より推定される：

$$r = \frac{E}{I} = \frac{\delta_I - \delta_L}{\delta_E - \delta_L}$$

ここで、Iは湖沼への流入量、Eは蒸発量、δ_Lは湖水の安定同位体比、δ_I、δ_Eは流入、蒸発のそれぞれの安定同位体比である。対象湖沼群は降水を供給源とする閉鎖性湖沼であるので、Iは降水量とみなすことができる (ただし、周辺地からの微小な集水を含む)。δ_Lは、各湖沼の δ¹⁸O の平均値とした。また、降水の平均的な安定同位体比を代替しているとみなして、ワノコの沢の安定同位体比を δ_Iとした。rの推定には、測定精度の高い δ¹⁸O を用いている。各湖沼の r は 14.4~71.9% と推定され、平均値は 45.1% である。修正Penman-Monteith式より求めた2009年8月までの過去1年間の本地域の年間実蒸発散量は383mmであった。同期間の降水量879mmに対する実蒸発散量の割合は41.6%であり、rの平均値45.1%とほぼ同程度といえる。

表 (3)-4 に各湖沼の水深、開水面面積、湖水体積を示す。また、湖底地形の例として図 (3)-11

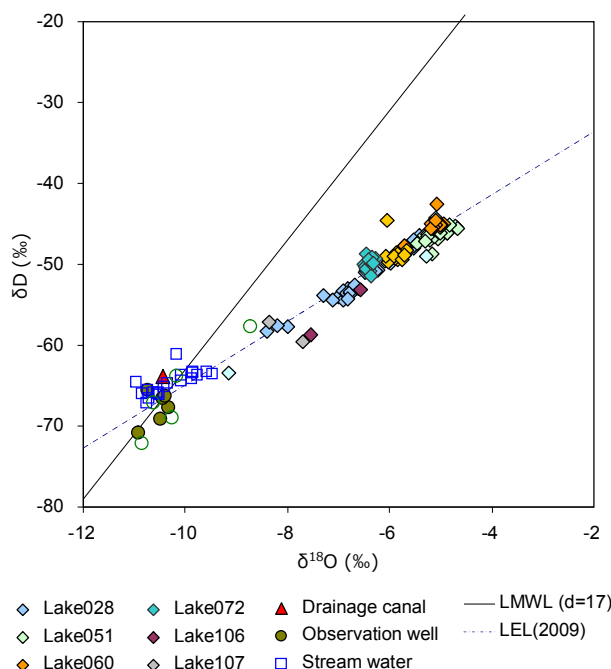


図 (3)-10 採水試料の δ¹⁸O- δD ダイアグラム

に Lake028 の等深線図を示す。開放水面の小さい Lake106~112 については調査地点である 1 点の水深を用いている。一般に、湖沼の水深に対して開放水面面積が大きい形状の湖沼は、貯留量に対して大気にさらされる水面面積が大きいことから、蒸発が大きくなる傾向にある (Rouse 2000; Turner et al. 2010) ¹³⁾¹⁴⁾。図 (3)-12 に湖

沼の水深、開放水面面積と r との関係を示す。開放水面面積が小さい Lake 106、107 は r が小さく、面積が大きい湖沼は r が大きくなる傾向にある。しかし、開放水面面積が増加したとしても、水深が深い場合は r が小さくなる傾向にあるといえる。

表 (3)-4 湖沼の水深および開放水面面積

lake	observation points	water depth [m]			water surface area [$10^3 \times m^2$]
		Avg.	SD	Max.	
028	114	1.34	0.54	2.77	425.5
051	40	0.67	0.39	2.04	114.1
060	22	1.39	0.75	2.83	16.6
064	30	1.75	0.30	2.62	90.7
065	19	0.67	0.25	1.40	16.2
072	25	2.19	0.57	3.42	77.4

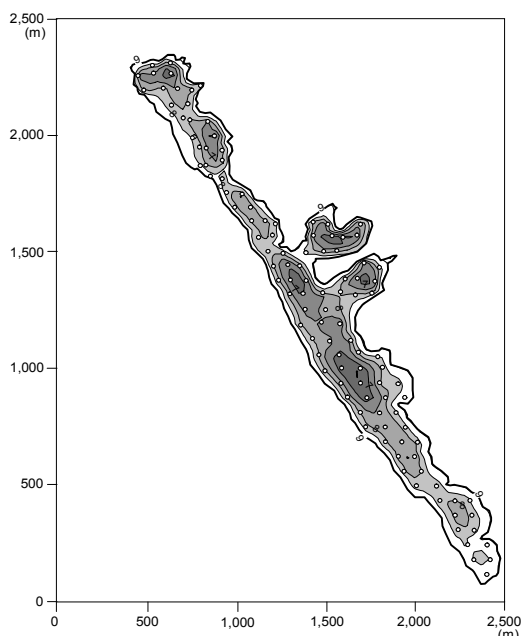


図 (3)-11 Lake028の等深線図

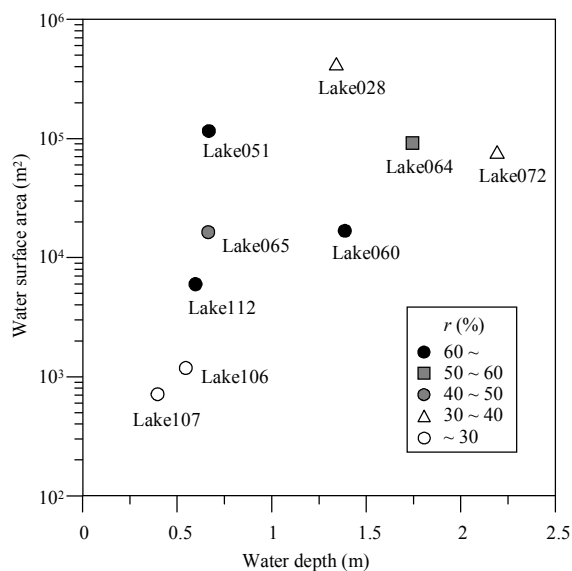


図 (3)-12 湖沼の水深、開放水面面積と r の関係

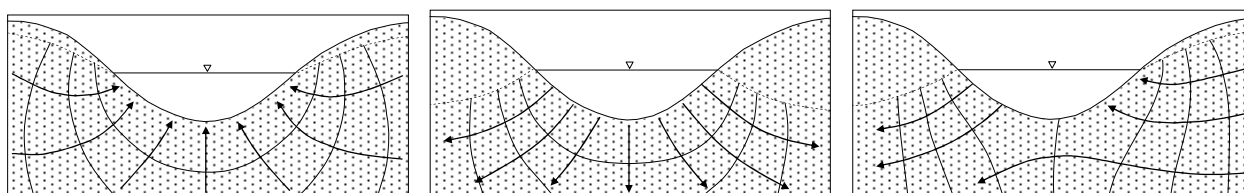
Lake 028はジュンサイ沼と呼ばれ、浮葉植物であるジュンサイ (*Brasenia schreberi*, water shield) が湖面を被覆していることが現地で確認された。根からの水の吸収では同位体分別は生じないが、植物による湖面の被覆によって湖水の蒸発は抑制される (Ramey 2004) ¹⁵⁾。このため、Lake 028は他の湖沼より大きい開放水面面積 ($426 \times 10^3 m^2$) を有するが、ジュンサイによる蒸発の抑制に伴い r は小さい値を示していると推測される。Lake028以外の湖沼では目立った浮葉植物の繁茂が確認されず、 r は図 (3)-12 に示すように、湖沼の水深、開放水面面積の大小関係から概ね説明可能である。

3) 地下水流動状況と湖沼群の位置付け

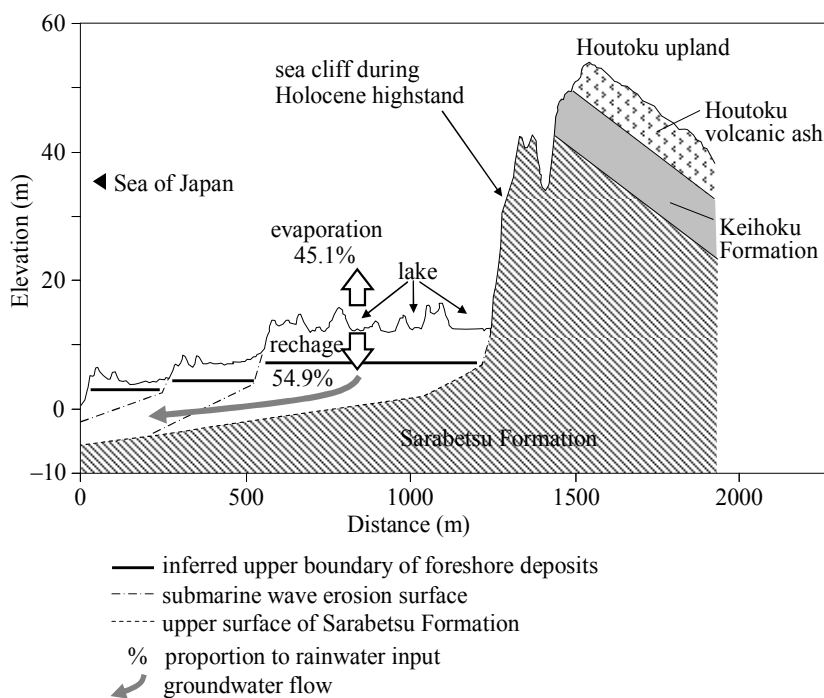
Born et al. (1979) ¹⁶⁾ は、湖沼を地下水の流れとの接続状況から、流出湖 (discharge lake)、涵養湖 (recharge lake)、通過湖 (flow-through lake) の3タイプに分類した (図 (3)-13)。本

研究で対象とした各湖沼は、地下水の流入が認められないことから、流出湖・通過湖には相当せず、涵養湖に分類される。湖沼群が分布する砂丘列帯は海食崖として接していることから、豊徳台地から西側へ供給される降雨の集水域は狭小であり（図(3)-14）、豊徳台地側からの砂丘列帯への地下水流入は極めて小さいと推測される。よって、湖沼群は地下水流動系における涵養域に位置した涵養湖といえる。

涵養型の湖沼であることは、同じ地点（OW-03およびOW-04）の2つの観測孔で、上位の泥炭層を対象とした孔の地下水位が下位の砂層を対象とした孔に比べて高く（図(3)-2）、下方へ流動が示唆されたこととも整合する。また、水位回復試験で得られた透水係数は泥炭層で 10^{-5} m/s程度、砂層で 10^{-4} m/s程度であり（表(3)-5）、このことから湖水が比較的透水性の低い泥炭層によって受け皿のように保持されていることが推察される。



図(3)-13 地下水流動に関連した湖沼の分類 (Born et al. 1979)¹⁶⁾
 左：流出湖 中：涵養湖 右：通過湖

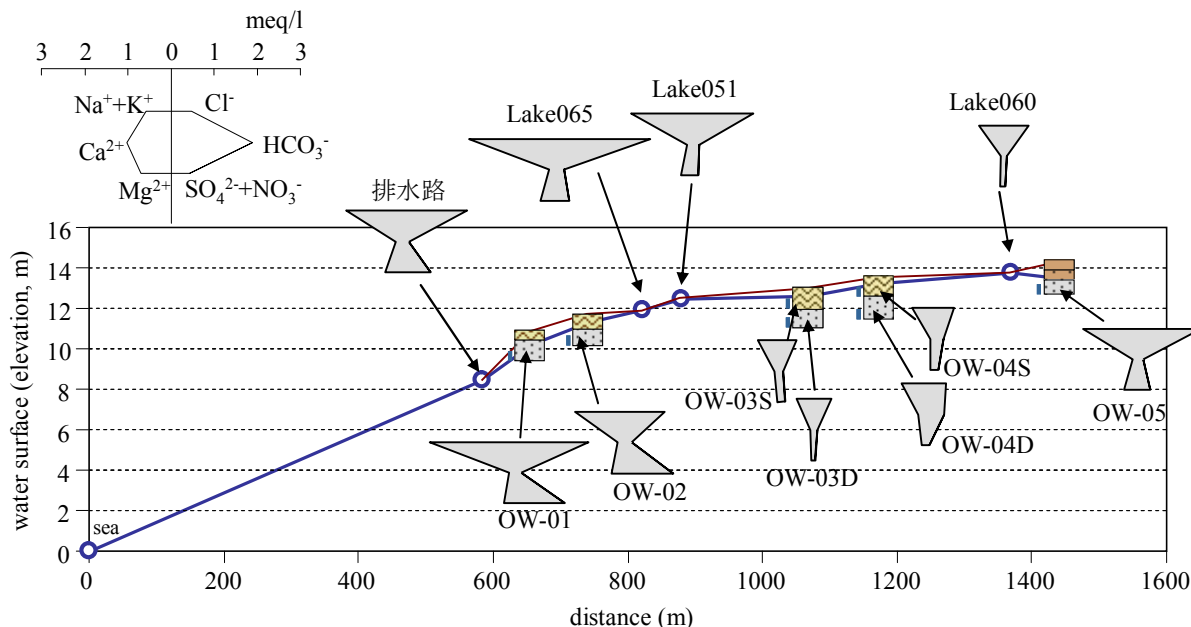


図(3)-14 砂丘列帯における湖沼群の位置及び湖沼からの蒸発と帯水層への涵養割合（断面図は川上ら（2010）⁵⁾、岡ら（2006）³⁾に加筆して作成）

表(3)-5 水位回復試験の結果から算定された透水係数

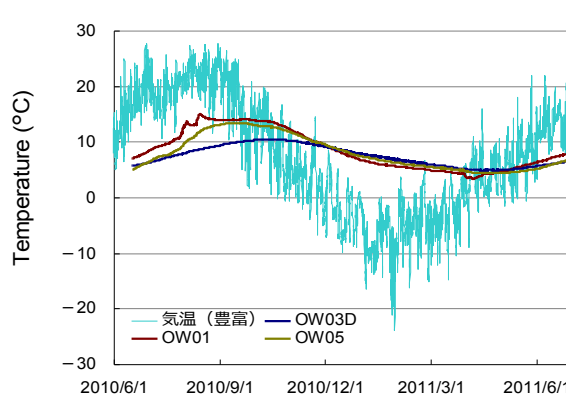
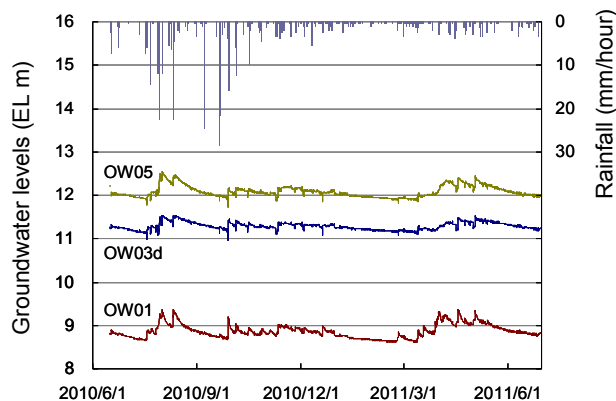
OW03S (泥炭層)	OW03D (砂層)	OW04D (砂層)
$2.11 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$	$1.51 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$	$8.77 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$

砂丘列帯の地下水は、湖水と同様に非重炭酸ナトリウム型の水質組成を示し、 Na^+ 、 Cl^- が卓越する傾向にある（図(3)-15）。ただし、砂丘列帯の台地側（OW-03、04）と沿岸農地側（OW-01、02）で地下水の水質組成はやや異なり、上部の湖水とそれぞれ類似した組成を示す。これは湖水、地下水ともにその地点の降水によって涵養されることで水質が形成されているためと考えられる。また、排水路の水質組成は直近の地下水（OW-01、02）の組成と類似しており、これら地下水が排水路へ流出していると推測される。



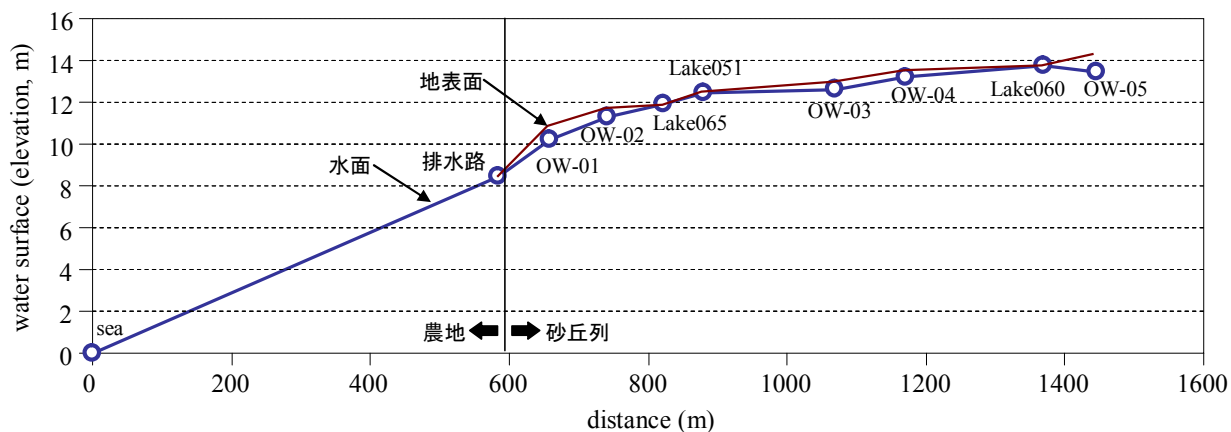
図(3)-15 砂丘列帯横断における地下水中主要イオンの組成（2010年6月）
赤線は地表面、青線は水面を示す。

自記計によって観測された地下水位および水温の変動をそれぞれ図(3)-16、17に示す。地下水位は降水に対して2日程度で反応しているが、地下水温と気温の相互相関関数は概ね40-70日でタイムラグが大きい。この水位変化は圧力伝播によるもので、水温変化は地下水の移流や熱伝導によって遅れていることが推察される。一方、OW01とOW05の水温は、OW03と比較すると、7月から8月にかけてのまとまった降水時に水温が上昇している。これは、まとまった降水時には大間隙を通過するような速い流れが発生している可能性を示唆している。



図(3)-16 自記計で観測された地下水位の変動 図(3)-17 自記計で観測された地下水温の変動

湖沼群へは地表流入と地下水流入が存在せず、降雨による供給と蒸発による損失と地下水流出のみにより水収支はバランスしている。湖沼群へ供給される降水に対して、地下水として流出する割合は、平均54.9%と推定できる。湖沼群は地下水流動系における涵養域で帯水層と接続しており、湖水は地下に浸透した後、地形・基盤面の傾斜に沿うように西側（日本海側）へ流動・流出していると推測される。砂丘列帯に設置した観測孔の地下水位は、東の豊徳台地側から西の海側へ向けて低下している（図(3)-18）。砂丘列帯の縦断方向の動水勾配は1/1,392（Lake060～106）、1/1,133（Lake028～060）であるのに対し、台地に近いLake060から農地の排水路までの動水勾配は1/147である。これらより、地下水流動は砂丘列帯を縦断する方向よりも、横断する方向へ卓越していることが示された。湖沼群の水位は、供給源としての降水量・降水パターンの変化、水面からの蒸発量の変化のみならず、下流側に位置する流動・流出域の地下水位変化に左右されるといえる。湖沼群の水環境を保全するためには、流動・流出域の地下水管理が必要であり、特に下流側に位置する沿岸農地の地下水管理が湖沼群の水文環境保全に重要であるといえる。



図(3)-18 砂丘列帯横断方向の地下水面形状（2010年6月）

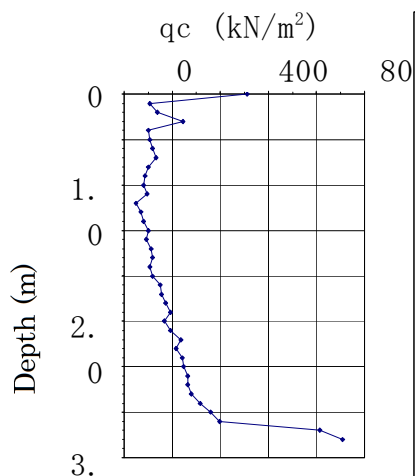
(3) 熱収支を利用した水収支の推定

1) 泥炭土壌の貫入試験結果

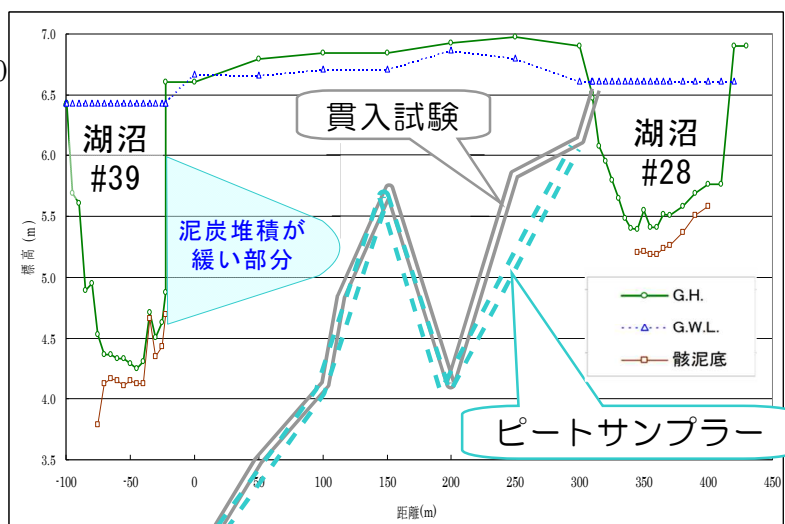
基準点SP0で行ったコーンペネトロメーターによる貫入試験結果を図(3)-19に示す。この地点（SP0）では、表層の貫入抵抗が500 kN/m²という大きな値を示し、深くなるに従い低下し、深さ0.8～1.6 mでは最も低く100 kN/m²以下となった。深さ2m以深では、深くなるに従い貫入抵抗は増加し、深さ3.60 mでは400 kN/m²となり、さらにその下では急激に増加し約900 kN/m²となっていた。この最も表層で高い貫入抵抗がみられたのは、ほぼ全ての地点で共通しており、泥炭上に植生が成立している地点の一般的特性と考えられる。またその下の貫入抵抗が低い層は、泥炭の堆積がゆるく多量の水を含んでいる層であり、最下の抵抗の大きな層は、泥炭層の基底にある砂質層と考えられる。このことはピートサンプラーによる調査結果とも合致していた。

図(3)-20に、SP-100からSP430を結ぶ調査線の横断測量結果を示した。図には、地表面高、水位および地下水面高、貫入試験およびピートサンプラーを用いて調査した泥炭層基底の高さを示した。貫入試験によって推定された泥炭層の基底と、ピートサンプラーによって推定された泥炭層

の基底はおおむね一致していた。この泥炭層基底、砂質層上面をみると、この横断面では、湖沼#28と#39以外に、SP150からSP300の間に窪みがあることが分かった。貫入試験結果から、泥炭が緩く堆積しているのは、3つの窪みのうち湖沼#39を含む最も東側の窪みであることが分かった。また地下水面の最高水位点はSP200とSP250の間にあり、両沼の水位はこれより低かったことから、SP200とSP250の間に分水界があると考えられた。このように基底地形と地下水面の点から、#28と#39の間に地下水の流動はなく、それぞれ独立していると考えられた。よって、以後の熱収支シミュレーションについては、高い計算精度が期待できる、開放水面面積が小さく、水深が深い#39について行うこととした。



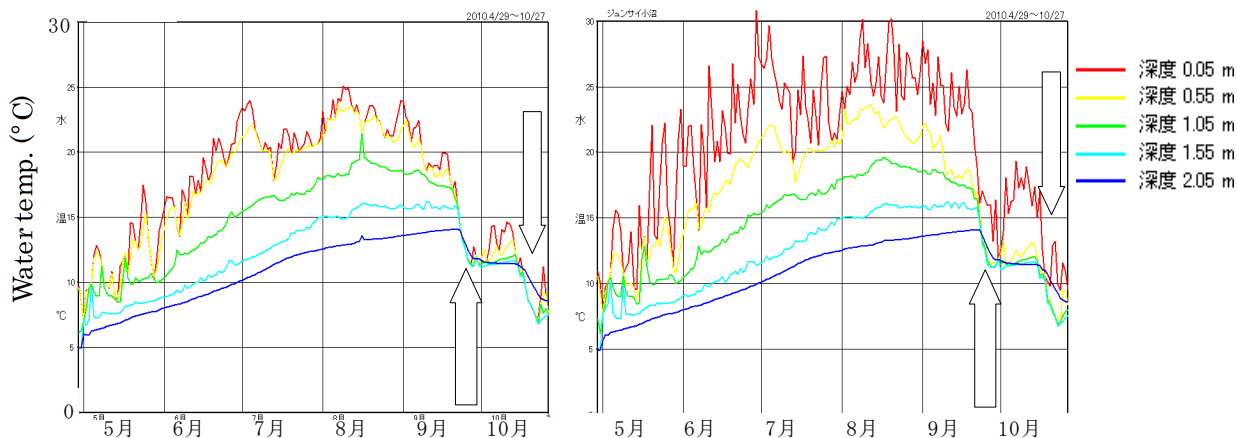
図(3)-19 貫入試験結果 測量基準点 (SP0) での例。



図(3)-20 横断測量結果 貫入試験およびピートサンプラーによって推定した基底面(砂層上面)、および湖沼・地下水位 (G.W.L.) も示した。

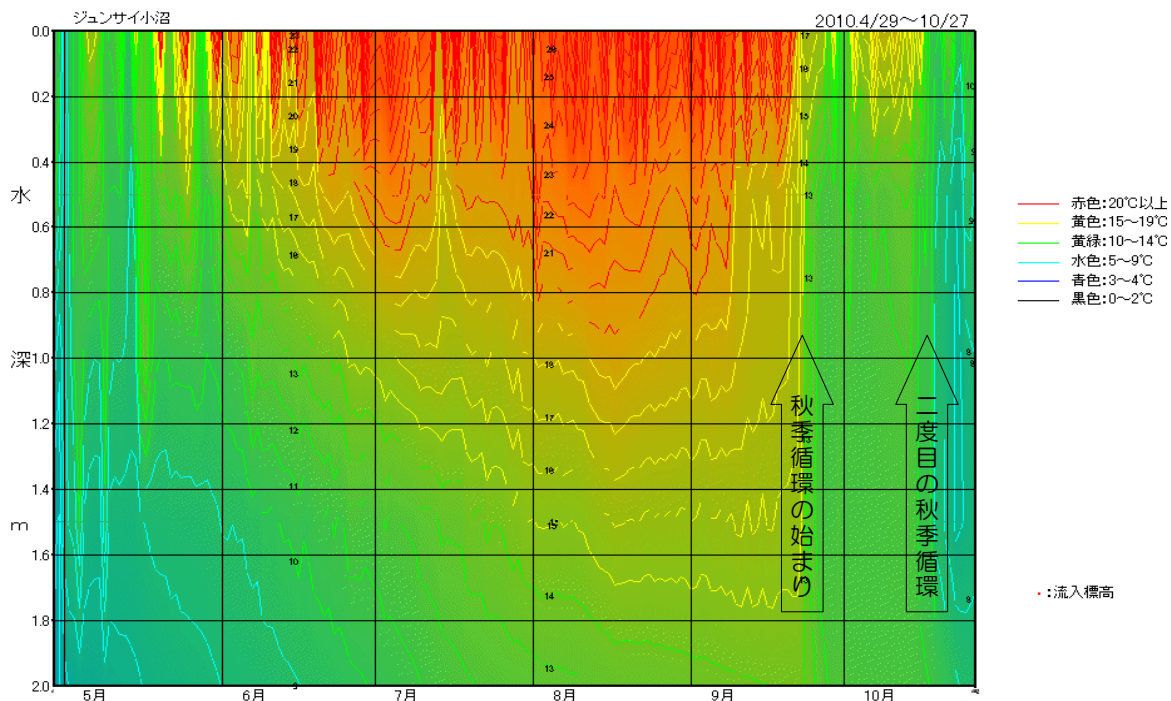
2) 水温観測

#39における2010年の水温計測結果を図(3)-21に示した。9月の中旬までは深い層ほど水温が低く温度変化が少ない傾向が午前2時、午後2時の両方で認められた。しかし表層5cm(深さ0.05cm中赤線)をみると、午前2時には深さ0.55cmと概ね同じ温度であるのに対し、午後2時には毎日顕著に変動している。これは、昼間は輻射熱・顕熱などが水面を通じて伝わりやすいため、正の水成層が形成されている暖候期には暖められた水が表面近くに集まって表面水温だけが極端に上がるためと考えられる。しかし暖候期であっても夜間には、放射冷却・顕熱伝達・潜熱(蒸発熱)伝達などで外に向かって出て行く熱が多く、表層の水温が直下の層の水温よりも低くなることで微小な規模の対流が起こり、両者が混合し、図(3)-21の午前2時の図のように表層(深さ0.05 m)と直下(深さ0.55 m)の層が混合されて均一に近い水温を示すものと考えられた。9月下旬と10月中旬の水温をみると、各層の水温が均一になりその直後に逆転する現象が観察された。これは温帯地域の湖沼に見られる秋季循環という現象で、表層水が過剰に冷却された結果、低層水よりも低温かつ重くなり下に潜り込んでいく現象で、これにより表層と低層の水が循環していることが分かる。



図(3)-21 湖沼#39における深度別水温の変化 午前2時(左)と午後2時(右)の結果を示した。矢印は秋季循環を示す。

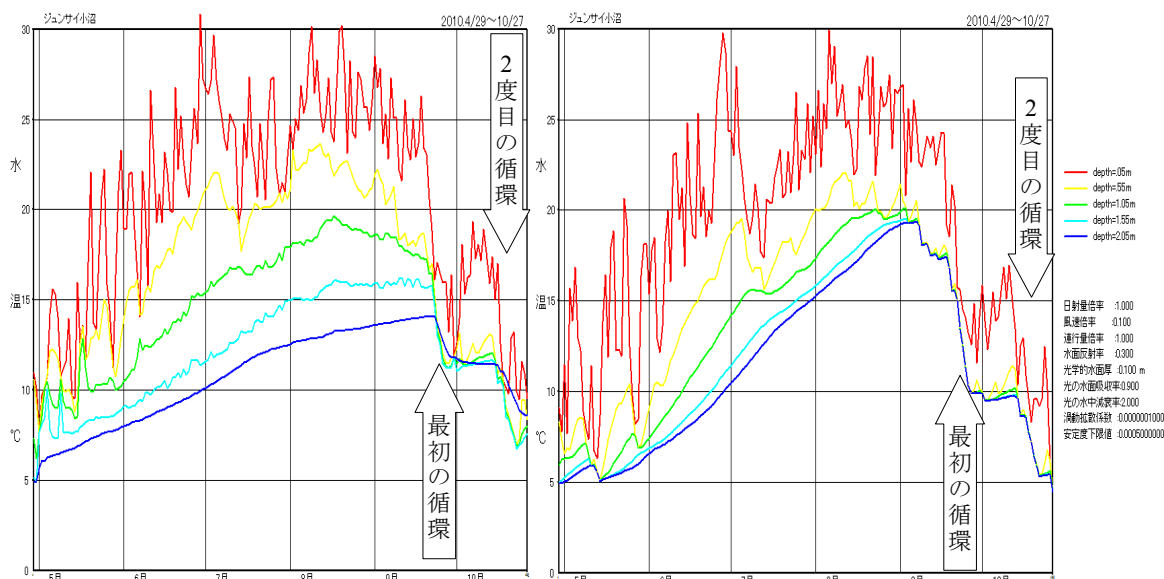
図(3)-22は同じ#39の昼間の水温分布を等温線として経時的に表した図である。4月末には全層の水温が一桁で、不安定な状態にあるが、日射が強まり気温も上昇してくると表面から徐々に熱せられ、拡散や伝導によって熱は、深い方へ伝わっていき表面に近い部分が高温になる。この傾向は4月末から9月半ばまで続くが、秋口になると表面が(放射冷却などで)冷やされる機会が増え、そのたびに下層との混合が起こり、極端な時には全層循環が起きていることが、この図からも理解できる。



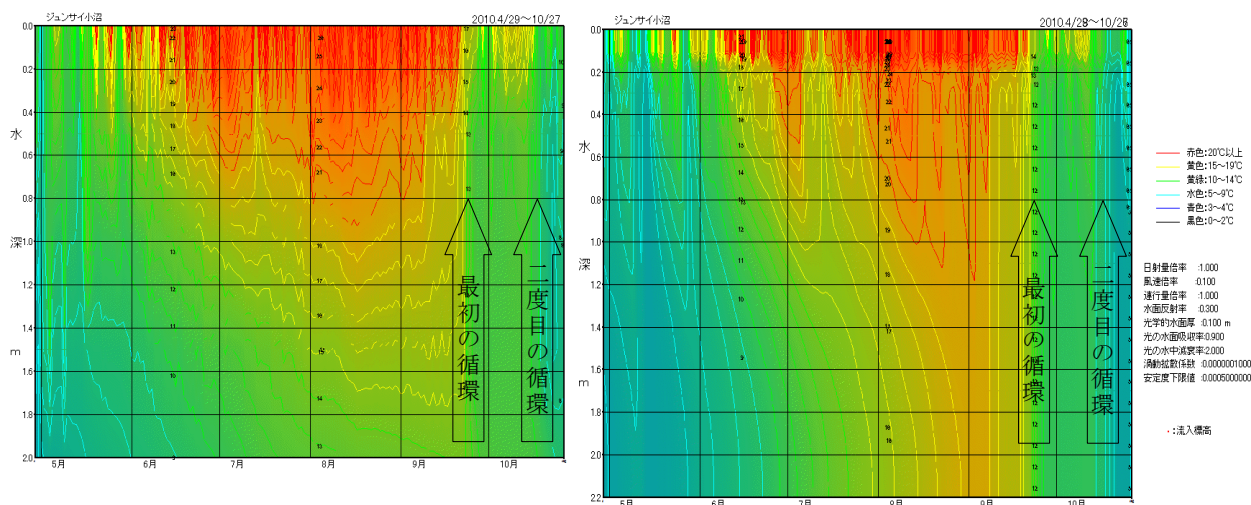
図(3)-22 実測水温分布変動図(ジュンサイ小沼(#39)午後2時:2010.4/29~10/27)

3) 熱収支をもとに推定した水収支

#39の温度変化について計算した結果を、実測値と共に図示した(図(3)-23、24)。実測にきわめて近い水温変動が再現され、秋季の2度にわたる循環も再現することができた。この図(3)-23、24に示した計算結果は、表(3)-6に示した設定境界条件のもとで実現したものである。以下に境界条件の値の特徴とその理由を述べる。風速は弱めな値となっているが、これは周囲の森林による遮蔽効果が表れた結果と見なせる。水面に関わる反射率・吸収率ともに大きくなっているが、これは夏季に繁茂するジュンサイをはじめとした浮葉植物によって水面が覆われるために、水中に入る光エネルギー自体が小さいこと、および入った光の多くも水面で吸収されることによると考えられる。光の水中減衰率が極めて大きいのは泥炭地特有のタンニンなどによって茶色く着色された水の色が原因と考えられる。また渦動拡散係数が分子拡散係数並みに小さい(実質的に渦動



図(3)-23 深度別水温変動図(左:ジュンサイ小沼の実測値,右:計算結果)



図(3)-24 水温分布変動図(左:ジュンサイ小沼の実測値,右:計算結果)

拡散が起こっていない) のは、やはり繁茂する浮葉のため風のエネルギーが水面から内部に伝達しないためと考えられる。

表(3)-6 設定した境界条件

項目	小沼で用いた最適値 (備考)	支笏湖で用いた最適値 (備考)
日射量倍率	1	1.2 (遮蔽物なし)
風速倍率	0.1 (森林による遮蔽)	1.2 (長い吹送距離)
水面反射率	0.3 (浮葉植物の繁茂)	0.03
光学的水面厚 (m)	0.1	2 (単位層厚)
光の水面吸収率	0.9 (浮葉植物の繁茂)	0.63 (稀にみる透明度)
光の水中減衰率	2 (タンニン色)	0.17 (稀にみる透明度)
鉛直渦動拡散係数	1×10^{-9} (水面隠蔽)	5×10^{-7} (通常 10^{-4} - 10^{-6})

表(3)-7には計算によって得られた熱収支の期間中総量を示した。実際のシミュレーションでは30分ごとの各項目の値を計算しているが、ここに示したのはそれらの集計値である。4月末から10月末までの無積雪期間における主たる熱の供給源は日射である。その内で沼の水に吸収される熱量が約43 kcal/cm²ある。出ていく熱は逆輻射、いわゆる放射冷却で約22 kcal/cm²、またほぼ同等の約18 kcal/cm²の蒸発熱となっている。大気との間での直接的な熱のやり取りで4 kcal/cm²が出て行くが、条件次第では入ってくる場合もある。

この期間の蒸発熱の総量(18,412 cal/cm²)を蒸発熱(582.8 cal/g)で除すると約316 (mm)を得る。すなわち、同じ期間の降水量775 mmに対して約40%の316 mmが蒸発していくという水収支の推定が得られた。

因みに、表(3)-7には年が異なるが同じ期間の支笏湖の熱収支量を参考値として掲載してした。水面温度を反映する逆輻射熱量は両者ともほとんど同じ値となっており、水面温度と気温との相対関係を反映する伝導顕熱量もほぼ等しい。これらに比べると、日射吸収量と蒸発潜熱は支笏湖よりも稚咲内#39の方が圧倒的に少なく、いずれも支笏湖の50%台と半分余りの量しかない。前者は水面反射率を大きく設定したことの結果として現れたと考えられる。

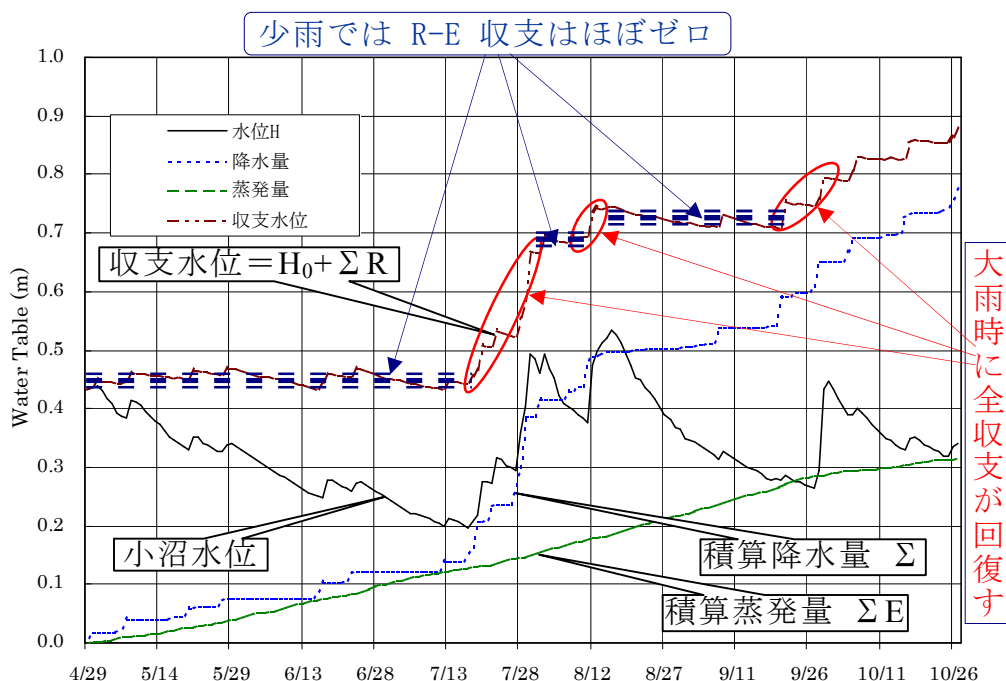
さらに顕著な相違は総熱収支である。4月末から10月末までといういわば暖候期の熱収支の総量が、#39では既にマイナスとなっているのに対して、支笏湖では同期間の全投入熱量の10%を超える10 kcal/cm²もの投入超過となっている。基本的な要因は深さ(支笏湖364 m、小沼2.2 m)であるが、一方で浮葉植物の繁茂や水の透明度に起因する水面反射率、水面吸収率、水中減衰率といった沼の光学的物理特性の相違を反映したものと考えられる。

表(3)-7 期間中熱収支総量

項目	小沼 (#39)	支笏湖 (参考)
計算期間	4/29 - 10/27	
計算対象年	2010年	1994年
日射吸収熱量	43,267.82	74,623.21
降水熱量	1,183.25	—
地熱量	23.59	23.40
逆輻射熱量	-22,479.84	-21,301.06
蒸発潜熱量	-18,412.85	-34,643.56
伝導顕熱量	-4,092.79	-4,018.25
拡散移流熱量	0.00	0.00
総熱収支	-510.82	10,205.76

4) 水収支の時系列変化

判明した水収支を時系列的に整理し図(3)-25に図示した。この図には小沼の水位と積算降水量 ΣR 、積算蒸発量 ΣE 、および水面からだけの水収支として $\Sigma R - \Sigma E$ も図示した。積算蒸発量 ΣE は継続的現象の反映でなだらかに上昇をつづけるが、9月末頃になると蒸発量が減り始めその傾斜角が小さくなっていた。一方積算降水量 ΣR は断続的現象のため階段状に上昇していた。水面で起こる水収支 $\Sigma R - \Sigma E$ は時折少雨が降る程度の期間はほぼ水平に推移していたが、大きな降雨イベント時には一気に上昇していた。これは沼の水位と連動しており、 $\Sigma R - \Sigma E$ が水平な期間は水位が逡減を続けるが、大きな降雨イベントがあり $\Sigma R - \Sigma E$ が上昇するとき一気に沼の水位が回復することを示している。また、地表水・地下水として沼に出入りする水収支は全体としてマイナスであり、大きな降雨イベントがない期間は蒸発量とも相まって#39の水位は下がり続けることになる。



図(3)-25 湖沼#39の水位H・降水量R・蒸発量Eの変動

ここで、湖沼の水収支の中で、地表・地下水としての沼からの流出量 Q_{out} から沼への流入量 Q_{in} を差し引いたものを流失量 Q_{loss} とする。

$$Q_{loss} = Q_{out} - Q_{in} \quad \dots\dots\dots (11)$$

沼の水位の変動を ΔH とすれば流失量は、降水量と蒸発量を用いて

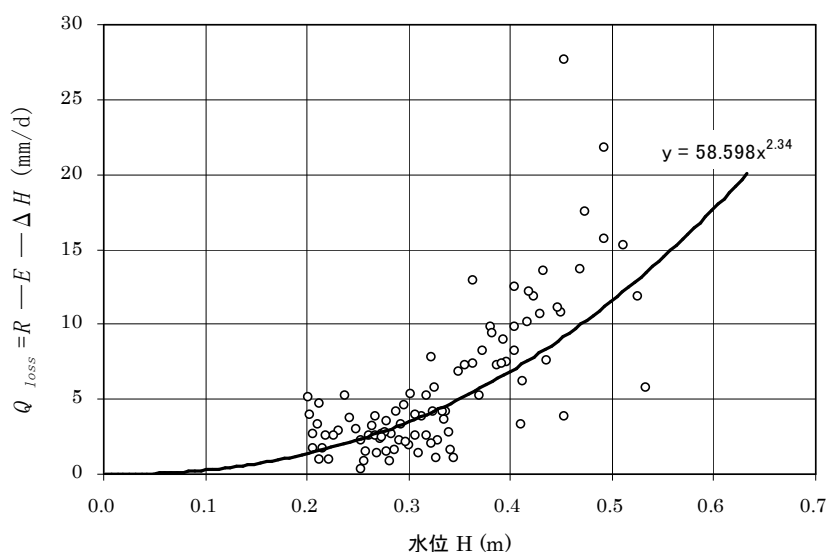
$$Q_{loss} = R - E - \Delta H \quad \dots\dots\dots (12)$$

と表わされる。

図(3)-25で湖沼#39の水位変動に着目すると、高い部分と低い部分とで逡減勾配が異なっている。

無降雨期間の湖沼の水位変動量 ΔH (mm/d) を、(12)式により水収支を考慮した流失量 Q_{loss} (mm/d) に換算し、その時の湖沼水位に関連させて整理すると図(3)-26の関係が得られる。

ここに示される水位 H は、現在設置してある水位計による実測値であるが、 $H=0$ の付近で逡減率も0に近い値に収束していくように見られる。また上に整理した期間中での最高水位は0.55m弱となっているが、低い方から $H=0.50$ m に近付くと流失量が急激に大きくなっている。この水位周辺で沼からの流出機構が変化しており、この地域の地下水位の上限となっている可能性が大きいと考えられる。



図(3)-26 水位変動に伴う流失量の変化

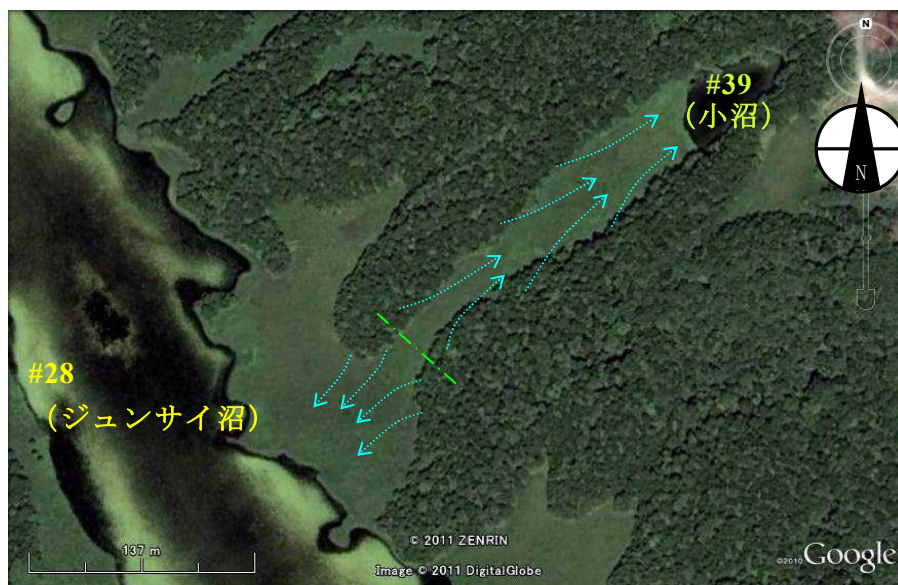
5) 熱収支を利用した水収支の推定についてのまとめ

面積的に大きな#28 (ジュンサイ沼) は水深が1m程度しかなく、観測のため沈設した水温データロガーも3台しか設置できなかった。つまり3層の水温データを取得したが、十分な分離ができず解析精度が確保できなかった。一方で#39 (ジュンサイ小沼) では小面積ながら水深が約2mあるため、水温データロガーを5台設置できた。普通の (水深がもっと深い) 湖沼では2mという深さは夏季にいわゆる表層の一部となって一体的な挙動をするが、当該湖沼では特殊な立地と物理的特性の結果として、各層が別々の独立した挙動をしていた。

この研究は、当初、これら小さな湖沼水温が一体的な挙動を行なっていることを前提にモデルを構築したが、良い方向に予想がはずれ、この前提下では理想的な観測結果・解析結果となったと言える。それと同時に高位泥炭地中の小池沼という特殊な水系における水温特性、光に関わる物性等が判明したことにより、今後この領域の研究に寄与するものと考えられる。

本来熱収支法を適用した際に副産物として得られる蒸発熱であるが、水の蒸発熱の大きさ (582.8 (cal/cm²)) を考慮すれば、蒸発熱を蒸発量に換算する際に相対的な精度が向上するであろう。そして、蒸発量を分離できるということは、地表・地下水流動による純粋な流失量も分けられることを意味している。この方法で#39では期間中降水量の約40%の水が蒸発で失われ、残りの大半は主に地下水として域外へ流出していくと考えられた。その浸透流出の方向は、図(3)-27

に示す向きと考えられる。この#28と#39を結ぶ観測線の地下は、泥炭が堆積する以前の海岸砂が基盤となっており、その基盤の起伏は3つの湖盆を形成していた（図(3)-20）。東西端の湖盆には現在#28と#39としての開水面が残っているが、中央の湖盆は完全に泥炭に埋め尽くされている。しかしこの中央湖盆にあたるSP 200とSP250において常時地下水位が最高になっているという観測事実からこの中央湖盆に対する地下水の涵養源がある可能性が示唆された。



図(3)-27 推定される水流動の向き（#28～#39）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 水循環系の中での湿原や湖沼の位置づけを、降水、河川水、地下水、湖水に対する環境同位体等の水化学指標や流量・水位・水温観測結果をもとに明らかにした点、およびその研究アプローチを提示した点は意義が大きい。特に、これまでまったく不明であった稚畷内砂丘林間湿地・湖沼群の水循環において、以下の点を明らかにしたことは、学術的意義が大きい。
- ・ 湿原や砂丘林帯湖沼群の水循環において、流路からの流出率は小さく、この地域の水循環において地下浸透や蒸発散の寄与が相対的に大きいことが示唆された。
- ・ 湖沼群は、地下水流入がないか極微量の涵養型閉鎖性湖沼であり、湖水は泥炭層を受け皿のようにして保持されていること、および湖水は時期によらず蒸発の影響を受けており、湖水への流入に対する蒸発の割合は湖沼の水深と開放水面面積との関係から概ね説明が可能であることが示された。
- ・ 砂丘列帯内の地下水流動は、砂丘列帯を縦断する方向よりも、横断する方向へ卓越しており、地下水は農地排水路へと流出していることが明らかとなった。
- ・ 湖沼水温の垂直分布を高い精度で再現する数値シミュレーションが開発された。ここで算出される蒸発熱を用いることで、複雑な気象観測等を行わずとも、より簡便な水温測定によって、湖沼からの蒸発散量の推定が可能となった。また泥炭地の小池沼における水温特性や、

光に関わる物性が明らかになったことは、基礎的知見としての意義も大きい。

(2) 環境政策への貢献

- ・ 砂丘列帯中の地下水は沿岸農地側へと流出しており、湖沼・湿地の水文環境保全には、沿岸農地側の地下水管理が重要であることが示唆された。
- ・ 観測孔での地下水位観測や酸素・水素安定同位体やラドンを用いたマルチトレーサー分析による水文特性調査の手法を提示し、沿岸湖沼群の水文環境変化のモニタリングに有効であることが示された。
- ・ 蒸発量の定量的推定法と推定値は、湖沼管理等の際の基盤情報となる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) 土原健雄、吉本周平、石田聡、今泉眞之:農業農村工学会論文集, 79(5), 339-348 (2011)
「環境同位体からみた沿岸湖沼群の閉鎖性の検討とその水文特性」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 岡田操:湿地研究, 2, 43-52 (2012)
「ダートムーアの泥炭湿地」
- 2) 岡田操:モーリー, 26, 印刷中 (2012)
「湿原よもやま話 I 眼からうろこがおちる話」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 土原健雄、吉本周平、石田聡、今泉眞之:第47回アイソトープ・放射線研究発表会 (2010)
「閉鎖性湖沼群における環境同位体分布特性」
- 2) 土原健雄、吉本周平、石田聡、今泉眞之:日本地下水学会2010年秋季講演会 (2010)
「環境同位体を指標とした北海道の閉鎖性沿岸湖沼群における水文特性の把握」
- 2) 吉本周平、土原健雄、石田聡、今泉眞之:日本生態学会第59回大会 (2012)
「環境同位体分析による閉鎖性湖沼群の地表水・地下水交流特性の解明」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 北海道開発局. 1999. サロベツ川水理地質調査検討業務報告書. 北海道開発局 p.183.
- 2) 北海道立地下資源調査所. 1981. 5万分1地質図幅及び説明書「稚咲内」. 北海道立地下資源調査所 p.26.
- 3) 岡孝雄・五十嵐八枝子・林正彦. 2006. ボーリングデータ解析及び花粉分析による天塩平野の沖積層の研究. 北海道立地質研究所報告 77: 17-7.
- 4) 産業技術総合研究所. 2006. サロベツ断層帯の活動性及び活動履歴調査「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書. p.25.
- 5) 川上源太郎・大津直・仁科健二・田村慎. 2010. 北海道北部 天塩平野沿岸に発達する浜堤列の地形と地質—サロベツ断層帯の完新世の活動に関連して—. 北海道立地質研究所報告 81: 65-78.
- 6) Ellins, K.K., Roman-Mas, A. and Lee, R. 1990. Using ^{222}Rn to Examine Groundwater/Surface Discharge Interaction in the rio Grande De Manati, Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 115: 319-341.
- 7) Cook, P.G., Favreau, G., Dighton, J.C. and Tickell, S. 2003. Determining natural groundwater influx to a tropical river using radon, chlorofluorocarbons and ionic environmental tracers. *Journal of Hydrology* 277: 74-88.
- 8) 濱田浩正・今泉眞之・小前隆美. 1997. ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法. 農業工学研究所報告 36: 17-50.
- 9) 橋治国・堀田暁子・南出美奈子・斉藤寛朗・川村哲司. 1996. 高層湿原およびその周辺水域の水質環境. *水環境学会誌* 19(11): 910-921.
- 10) 堀内晃・斉藤寛朗・南出美奈子・橋治国. 1997. 高層湿原の水環境と保全II -サロベツ湿原周辺水域の水質環境-. 衛生工学シンポジウム論文集 5: 205-210.
- 11) 庄子貞雄. 1976. 日本の土壌—⑥泥炭土. *アーバンクボタ* 13: 14-15.
- 12) Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Sakae, H. 1973. Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water system. *Geochemical Journal* 7: 123-151.
- 13) Rouse, W.R. 2000. The energy and water balance of high-latitude wetlands: controls and extrapolation. *Global Change Biology* 6(1): 59-68.
- 14) Turner, K.W., Wolfe, B.B. and Edwards, T.W.D. 2010. Characterizing the role of hydrological processes on lake water balances in the Old Crow Flats, Yukon Territory, Canada, using water isotope tracers. *Journal of Hydrology* 386: 103-117.

- 15) Ramey, V. 2004. Evaporation and evapotranspiration -plant management in Florida waterways-. Center for Aquatic and Invasive Plants, University of Florida, and the Invasive Plant Management Section of the Florida Fish and Wildlife Conservation Commission. <http://plants.ifas.ufl.edu/guide/evaptran.html> (参照2011.1.6)
- 16) Born, S.M., Smith, S.A. and Stephenson, D.A. 1979. Hydrogeology of Glacial-Terrain Lakes, with Management and Planning Applications. *Journal of Hydrology* 12: 7-43.

(4) リモートセンシング及びGIS技術を用いた湿原および湖沼生態系の総合監視システムの開発

北海道立総合研究機構環境・地質研究本部 環境科学研究センター
 特定非営利活動法人EnVision環境保全事務所

高田 雅之
 立木 靖之

平成21～23年度累計予算額：7,940千円

(うち、平成23年度予算額：2,600千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】 湿原・湖沼生態系を対象とした環境変動モニタリング手法について、以下の7点を実施した。(1) 湿原地下水位のモニタリングでは、複数地点における地下水位変動を継続的に観測し、地点間の差分を追跡することが簡便かつ効果的であることを明らかにした。(2) 植生のフェノロジーを中長期的に観測する手法として、市販のデジタルカメラを用いて環境(植生及び水ストレス)変動を検知する手法の実用性を示した。(3) 広域的視点から水文に関わる因子がササ植生拡大に寄与していることを明らかにしたとともに、ラジコンヘリ(UAV)と組み合わせることで今後密度が増加するポテンシャルを評価する可能性を示すことができた。(4) 多バンド高分解能衛星(WorldView-2)を用いて、環境(植生及び水ストレス)変動をモニタリングすることの有用性を提示した。(5) 近年個体数を急激に増やし、湿原植生への影響が懸念されているエゾシカについて、目撃情報を集積し分析することで、簡易にその分布と湿原利用の全体的な傾向を把握する手法を示すことができた。(6) 空中写真と地形測量結果をもとに湖沼水位の経年変化を推定する手法を提示した。(7) 近年の土地利用変化が大きい地域にある周囲長/面積比の大きい湖沼は、今後特に監視が必要であることを指摘した。

【キーワード】 水位の経年変化、定点カメラ、GIS、リモートセンシング、UAV

1. はじめに

本研究対象の一つであるサロベツ地区は、様々な環境が複合的に構成されるとともに、連続・不連続の空間変動特性を有することが、これまでの研究で明らかとなっている。また時間の経過とともに、人為的な影響が徐々に波及し、ゆっくりとした変化を及ぼすことも科学的に追跡しなければならない。このような生態系を保全管理の観点から適切にモニタリングするためには、フィールドでの調査計測に加えて、空間変動を考慮した広域的な視点から現状と特性を把握するとともに、変化の予兆と可能性を発見するアプローチが必要である。加えて、中長期的な視座から、年変動及び季節変動(フェノロジー等)のパターン変化を定量的に追跡していく手法の確立も求められる。

次に、稚咲内砂丘間湖沼群についてみると、海岸に平行する20km以上の砂丘列の間にみられる大小170以上の湖沼と砂丘林とが希少で特徴的な景観を呈している。このような広い範囲に点在する湖沼群をモニタリングするためには、空中写真や衛星画像などの広域を対象としたリモートセンシングデータを用いることが有効である。一方で空中写真や衛星画像は、湖沼生態系を監視するうえで重要な水位についての情報を得ることは難しい。広域を対象とし、さらに水位について

も推測可能な手法の確立が求められている。

2. 研究開発目的

以上の問題認識に基づき、本研究では、まず上サロベツ湿原を対象として、(1) 現地観測による地下水位の年変動及び広域評価、(2) 自動撮影装置による植生フェノロジーの把握、(3) ササ前線の変動要因の解析と動態モニタリング、(4) 高分解能衛星画像を用いた環境変動の推定、(5) 大型野生動物(エゾシカ)の生息動向モニタリング、についての手法を検討した。次に、稚咲内砂丘間湖沼群を対象として、(6) 空中写真を用いた湖沼水位の経年変化の推測、(7) 今後特に監視が必要な湖沼・地域の抽出、を行った。

3. 研究開発方法

(1) 地下水位の年変動及び広域評価手法の検討

降水涵養性の高層湿原において水文環境は極めて重要であり、環境劣化を招く地下水位低下の予兆を、的確に検知する手法が求められる一方、地下水位変動を精度よく観測することはできても、その年の降水量によって平均レベルが大きく変動することもあり、それが低下傾向にあるかどうかを評価する手法は十分研究されているとは言い難い。

そこで本研究では、長期にわたって観測している石狩泥炭地でのデータを用いて以下の簡易な指標を比較し低下傾向の有無を検知する手法を検討した上で、サロベツ湿原への適用を試みたとともに、最良と思われる指標を用いて広域的な分布傾向について評価した。

- ①地下水位の統計値：最も簡易な指標として、期間内の平均水位、最高水位、最低水位、変動幅、変動量(標準偏差)を算出した。
- ②比産出率：降雨による地下水位上昇から算出(降水量(mm) / 水位上昇量(mm))した。比産出率は土壌の空隙率を表すものとされ、湿原が乾燥し泥炭の分解が進むと隙間が減少し小さな値となる。
- ③雨量補正した貯水量：年々の降水量変動の影響を取り除く試みとして、地下水位を任意の基準面からの貯水量に換算し降水量あたりの貯水量((地下水位-基準面深さ)(mm) / 降水量(mm))を算出した。
- ④地点間の水位差：地点間の相対的な水位差の変化に着目し、統計値(①)の地点間(例えば中心部と排水路近傍など)差分を算出した。

地下水位観測は自記式の地下水位計(センサ：HM-500/HIT-ALI(株ハイネット)、データロガー：UIZ3635(株ウイジン))を使用し、上サロベツ地区の植生分布を考慮して設定した観測ラインを基準として地点選定し設置した。地下水位観測地点数は32地点(ミズゴケ植生：5地点、ミズゴケースグ植生：9地点、スグ植生：3地点、ササ植生：10地点、ヨシまたはイワノガリヤス植生：3地点、道路側溝：2地点)で、1時間インターバルで連続的に取得した。得られたデータは、キャリブレーションで得た圧力と水位との関係式(校正式)から地表面との相対水位に換算した。解析対象期間は植物生育期間を考慮して各年の5~9月とした。

(2) 自動撮影装置による植生フェノロジーの把握手法の検討

湿原における開葉、開花、落葉といった生物季節イベントを検知することは、人為的影響による乾燥化や気候変動など、数年から数十年単位で植生や生物季節の変化を着実に検出し追跡する

観点から重要である。本研究では、デジタルカメラを用いて、自動インターバル撮影を行うことにより、植生や生物季節の変化追跡を試みた。

2009年6月6日～10月17日、2010年5月12日～10月27日にカメラを設置して画像を取得した。通常の可視域撮影用と、フィルター操作による緑～近赤外域撮影用の2台を使用した。使用したカメラは、可視域はCanon G10、近赤外域は、2009年：ADC3(Dycam)、2011年：Canon G11である。湿原を見渡せる建築物にカメラを設置し（図(4)-1）、タイマーにて日中1時間間隔で自動撮影を行った。得られた画像（JPG形式）からデジタルカウントを抽出し、合計値に対する比を算出した。その際、近赤外域カメラについては感度補正を行った。次に、画像間のズレ補正を行ったのち、画像内に植生の違いを考慮して2009年は5箇所、2010年は8箇所の解析範囲を設定し、それぞれ毎日14時の値、植生の量や活性を表すNDVI（Normalized Difference Vegetation Index：（近赤外－赤）／（近赤外＋赤））、紅葉時期を検出するGRVI（Green and Red ratio Vegetation Index：（緑－赤）／（緑＋赤））、緑の濃さを示す2G-RB（Green Excess Index：2×緑－（赤＋青））の各平均値を算出し季節変動解析を行った。なお悪天候などによる暗い画像は解析対象外とした。併せて現地において植生相観調査を行い、植物種ごとの群落高と被度を記録した。

併せて前記で計測した近傍での地下水位観測データを用いて、画像から取得算出した各値との関係について乾燥ストレスに関する情報が内在するか否かについても検討した。



図(4)-1 カメラの設置状況

(3) ササ前線の変動要因の解析と動態モニタリング手法の検討

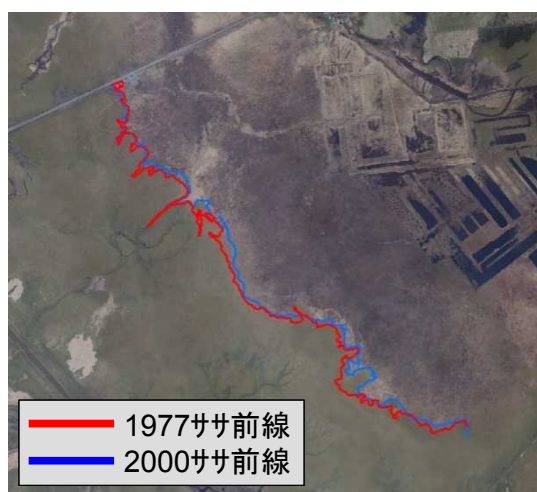
ササの拡大には、生物的要因、水文・土壌要因、化学的要因等が複合的に関係し、それらの要因の空間スケールも微環境から広域まで様々である。本研究では、広域的視点からササの変動要因を解析し、どのような地理空間要因がササの拡大に関わっているのか評価することを試みた。

ササの拡大に関するデータは、富士田ほか（2003）¹⁾が1977年と2000年の空中写真を判読抽出した情報をGIS化したものを使用した（図(4)-2）。環境要因に係る地理空間情報としては、Takada et al.（2009）²⁾において作成した標高、傾斜、植生高、集水量（集水面積）、地盤沈下量、表層泥炭の理化学特性（乾燥体積密度、炭素体積含有率、有機物含有率）、排水に効いていると考えられる湿地溝及び埋没河川までの距離を使用した。

まず、ササ前線が標高及び湿地溝までの距離に応じて分布すると概観されることから、北（湿

原を横断する道路とササ前線の交点)を起点に2000年のササ前線の10mごとに、その地点の環境要因に係る地理空間情報(上述)の値を抽出し、両者の関係性を分析した。次に2時期のササ前線の中間線を引き、100m間隔で100×100mの正方形を中心線上に発生させ、解析区域とした(図(4)-3)。そして解析区域内における各地理空間情報の平均値及び変動量と、中心点と湿地溝及び埋没河川までの直近距離を説明変数とし、各区域内のササ拡大面積を目的変数とした重回帰分析を行い、どの因子がどの程度、ササの拡大に寄与しているかについて分析した。

次いで、より高精度かつ効率的なササ前線の検出手法について検討することを目的として、UAVを用いた画像取得及び判読を試みた。旧木道周辺域の約150×500mの範囲を対象に、2010年10月8日に自律型ラジコンヘリ(Falcon-PARS)を用いて、対地高度40m、地上解像度1cmにて画像撮影を行った。オルソ処理された画像からササ前線を目視判読により抽出し、GISデータ化し、空中写真判読によるササ前線との比較を行った。



図(4)-2 2時期のササ前線



図(4)-3 解析対象区域

(4) 高分解能衛星画像を用いた環境変動の推定手法の検討

最新の高分解能衛星画像(WorldView-2:分解能2m、可視～近赤外の8バンド)を用いて、ササ前線の検出及び地下水位変動との関連分析に係る適応解析を行い、植生及び水環境変動の検出可能性について検討した。使用した画像は、2010年の春～夏(撮影日:5/30, 6/26, 8/26)に取得された3画像で、デジタルオルソ空中写真を参照に用いて幾何補正を行ったのち分光放射輝度値に変換した。なおWorldView-2画像は、米国DigitalGlobe社及び日立ソリューションズより提供いただいたものであり、成果にはDigitalGlobe社の著作権が含まれている。

2007～2008年に129地点で実施した現地植生相観調査のデータを用いて、判別分析を使った植生区分を行った。植生区分は6クラス(ミズゴケ植生、スゲ植生、ササ植生、ヨシ・イワノガリヤス植生、ミズゴケスゲの混合植生、スゲササの混合植生)とし、画像別のほか、ステップワイズ分析で選択性の高いバンドを選定し3時期3バンドを組み合わせたケースで判別分析を行った。その結果得られた判別式を用いて、西から東に移動しているとされるササ前線域の一部において植生区分を行い、空中写真(2003.5.20撮影)から判読したササ前線(藤村 未発表)との比較を

行うことによって、衛星画像によるササ前線の抽出及びモニタリングへの適用可能性について検討した。

次に、水ストレスに関する情報検出の可能性を探るため、地下水位観測データ（26地点、圧力センサによる連続観測）から、水位の高低に応じて輝度値が変化するか否かについて解析を試みた。地下水位は画像撮影時刻におけるデータを用いた。輝度値は植生及び生育時期によって異なることを考慮し、その影響を最小とするため、植生の状態が近いと考えられる6月と8月の同地点でのバンドプロファイルの比較を行うとともに、同時期で同じタイプの植生地点のバンドプロファイル比較、及び地下水位と輝度値との相関について分析した。

（５）大型野生動物（エゾシカ）の生息動向モニタリング手法の検討

本地域において近年急速に数を増やし、2011年夏には大規模なエゾカンゾウの食害が確認されるなど、湿原生態系に将来甚大な影響を及ぼすおそれのある大型野生動物（エゾシカ）を対象に、影響モニタリングを早期に開始するための動態把握手法について基礎的な検討を行った。まず2009年には湿原内のシカの踏み道脇に自動撮影装置を取り付け、どの程度の頻度でエゾシカを検知できるか試みた。次いで2010年の予備調査を踏まえて2011年には春から秋期をとおして、上サロベツ地域周辺において、エゾシカの目撃情報を収集した。情報収集は上サロベツ湿原を拠点として自然環境保全活動を実践しているNPOサロベツ・エコネットワークに依頼し、目撃した位置、日時、オス・メス・幼獣の区別を記録した。

得られた目撃記録をもとに、月別のオス・メス・幼獣の割合、全体及び地区別の目撃個体数の季節変化、目撃個体数の時間帯変化について分析を試みた。

（６）空中写真を用いた湖沼水位の経年変化の推測

1) 対象地域の区分

稚内砂丘林は海岸線に沿って南北に長く広がっている。地域によって、周辺の土地利用や地形が異なるので、本課題では、北・中・南部の3地域に区分した。ここで北部は稚内-豊富町境界以南から道道稚内豊富停車場線以北（以下、「北部」とする）を、中部は道道稚内豊富停車場線以南から豊富-幌延町境界以北（以下、「中部」とする）を、南部は幌延町内に含まれる砂丘林（以下、「南部」とする）を示すこととする。

2) 高解像度空中写真の整備と写真判読

本研究を実施するにあたり、最新年度の空中写真を撮影した。写真は2009年6月に撮影した。地上解像度は40cmであった。この写真を2009年度及び2010年度にかけてデジタルオルソフォトとして整備した。整備されたオルソフォトを用い、GISによって湖沼の開放水面を判読した。判読は縮尺1/1000よりも拡大して実施した。なお、1947年、1964年、2005年に撮影された空中写真による開放水面データは、北海道森林管理局が作成したGISデータを用いて解析に利用した。

3) 湖岸地形の計測

湖沼を実際に踏査し、空中写真で開放水面が明確に読み取れた湖沼の湖岸地形をコンパス測量によって計測した。調査は2009年夏期、2010年夏期にそれぞれ実施した。なお、計測を行った湖

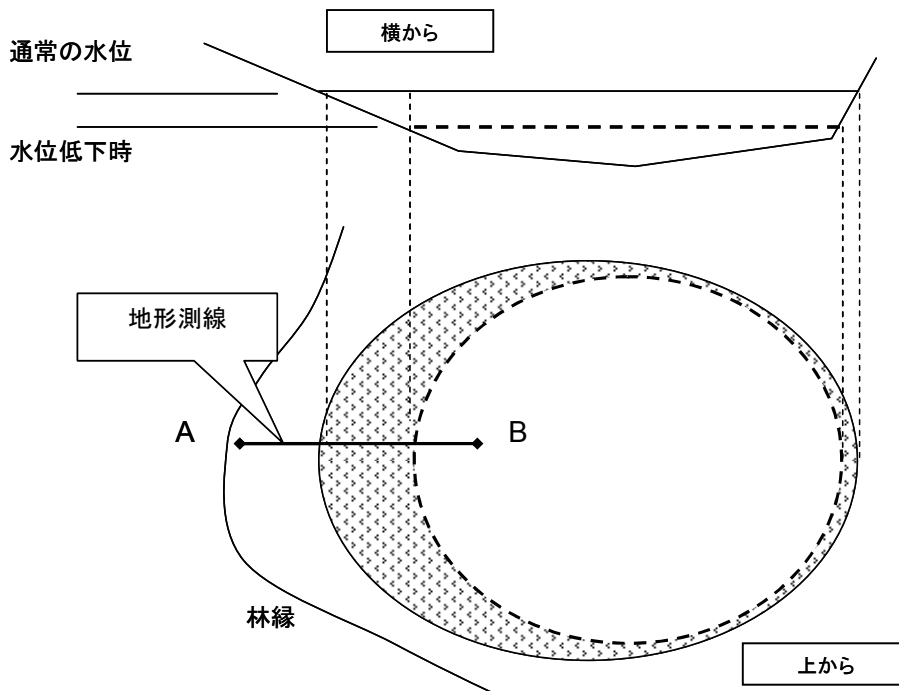
沼は、北部砂丘林、中部砂丘林、南部砂丘林に満遍なく広がるようにした。さらに、計測を行った箇所はGPS（THALES Navigation社製MobileMapperPro）によって位置を記録し、後処理DPGSによって誤差補正を行ったうえでGISデータとして利用した。

4) 水位の推定方法

本研究で用いた水位の推定法の考え方を図(4)-4に模式的に示す。この湖沼では、測線A-Bの箇所がなだらかな傾斜で、その対岸は傾斜が急な湖岸の形状をしている。そこで、測線A-Bの地形を予め計測しておく。そのうえで、多時期の同一湖沼の湖岸の位置を重ねることで、水位の変動を推測するものである。

解析では、解像度が高く最も年代が古い写真として1964年を利用し、この時点での水位を「0」として、それ以外の年代（1947年、2005年、2009年）の変化を求めた。さらに、「水位の変化」を従属変数、「北・中・南部」「年代」を独立変数として分散分析を試行し、水位変化に影響を与える要因について考察した。

また、調査対象とした湖沼には、なだらかな湖岸地形を持つ「皿型」の湖沼と、急な湖岸地形を持つ「鍋型」の湖沼が見られた。皿型の湖沼は開放水面の消長がはっきりと空中写真で読み取れるが、鍋型は湖岸（水際線）の変動が少ないためにこれが水位変化に応じた開放水面の変化が把握しづらい。予め測線を設定しておくことで、鍋型の湖沼も水位の変動が推測できるか、あるいは、本手法を用いる際にはどのような湖岸地形を選択するべきか、といったことについても考察を行った。



図(4)-4 水位推定の考え方模式図

(7) 今後特に監視が必要な湖沼・地域の抽出

1) 湖沼形状と水位低下の関係

湖沼に対する周囲からの影響の大きさは、湖沼の面積や形状によって異なると考えられる。そこで、単位湖沼面積あたりの周囲からの影響の受け易さを表す指数として、開放水面の周囲長(m)を面積(m²)で除した値(以下、P/A値とする)を求めた。このP/A値と、1964年から2009年までの水位変化との関係から、周囲からの影響の受け易さが水位の変化に及ぼす影響について考察を行った。

2) 土地利用図の編集

砂丘帯の地下水位や湖沼水位には、砂丘帯周囲の土地利用が影響を与えることが推測される。そこで、1967年と2000年の土地利用図(環境省所有、データ範囲は豊富町のみ)を用いて、過去(1967年)には自然植生であった箇所、2000年に明らかに人工の地物(牧草地や建物等)に変化した箇所を抽出した。さらに、これをラスタ化し、GISの近傍統計解析機能を利用し、それぞれのメッシュに対して半径250m円内に含まれる「人工物に変化した面積」を合計し、それぞれの地域における「人工物への変化率図」を作成した。

3) モニタリング方針の考察

各湖沼について推定された1964年から2009年にかけての水位減少率が大きな湖沼と、P/A値が大きな湖沼を、「人工物への変化率図」にオーバーレイし、これらを比較することで、どのような地域で、今後監視が特に必要であるかを検討した。

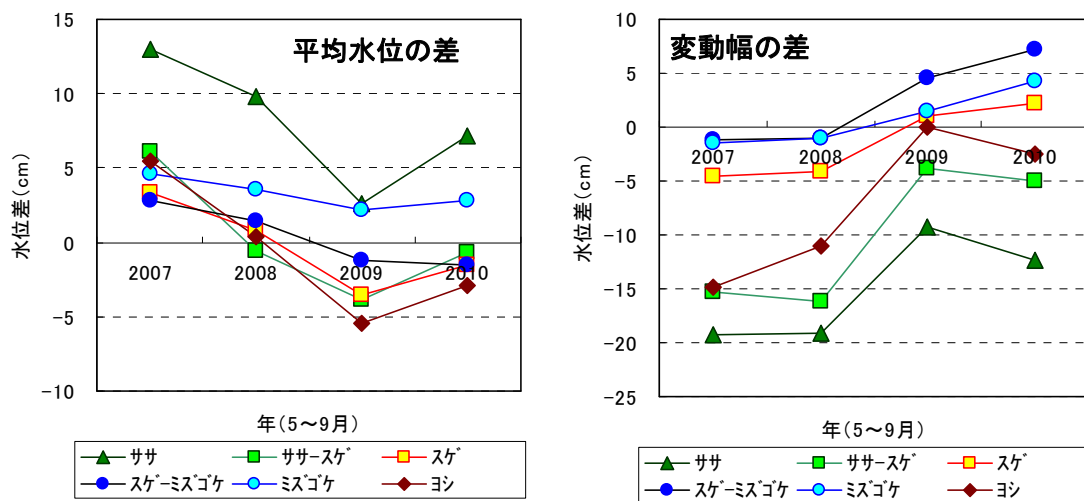
4. 結果及び考察

(1) 地下水位の年変動及び広域評価手法の検討

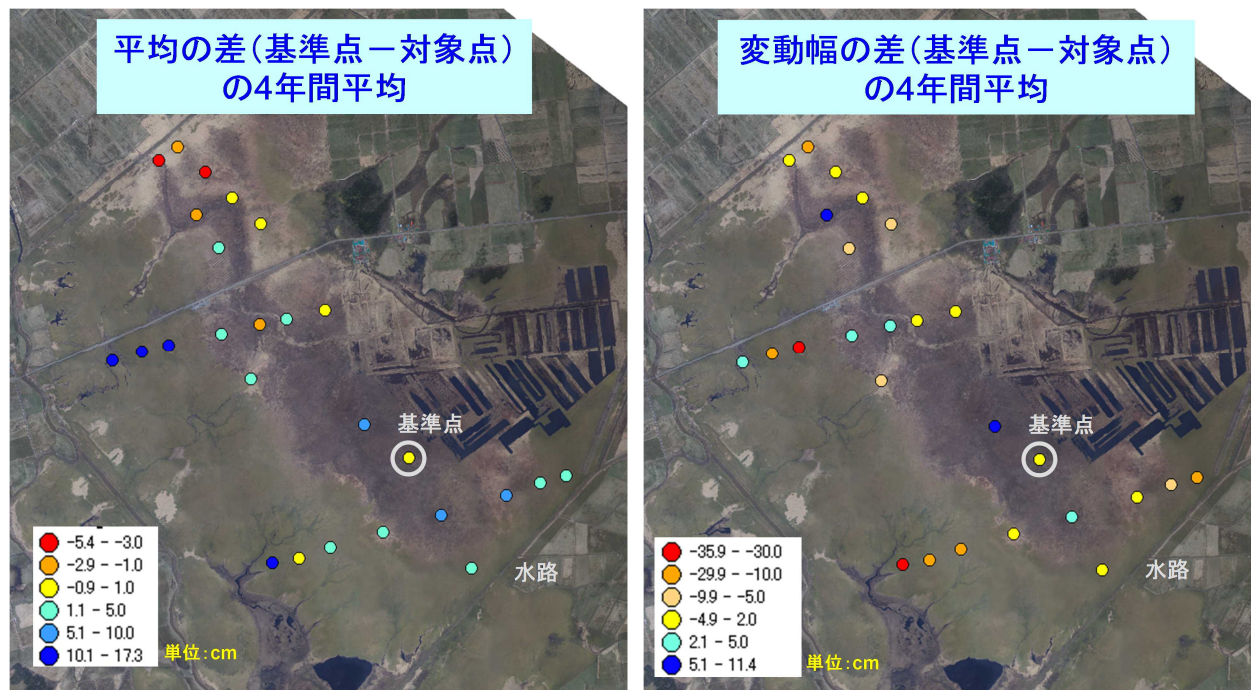
地下水位は毎年の降水量に応じて変動するため、この影響を除いて中長期的なトレンドを検出するための複数の手法を比較検討した結果、地下水位変動(平均・最高・最低・変動幅・変動量)よりも、降水量変動を考慮した補正貯水量、地下水位変動から産出される比産出率(土壌空隙率)といった評価指標が有効であり、特に湿原中心部との差を取って相対変化を追跡する手法が最も有効であることが示された。比産出率は降水量の多い年には高くなる傾向があった。これは高い水位が維持された状態が続くと、降水量が増えても水位上昇量はそれに伴って必ずしも増加しないことに起因すると考えられる。雨量補正した貯水量は基準面の取り方によって変化が増幅される傾向が見られた。それに対して地点間の地下水位差は、いずれも一定方向に近い興味深い年変化傾向が示された。

図(4)-5にサロベツ湿原において、中心部のミズゴケ植生域の地点と各地点との差を求め、植生クラス別に平均をとった結果を示した。これを見ると、植生に応じた差が見られたとともに、高層湿原中心部での地下水位低下及び地下水位変動の増大が進んでいる可能性が示唆された。以上の4方法を総合的に評価すると、地点間の地下水位差が、潜在的な環境変化を検知する上で有効な手法である可能性が示されたものの、一つの指標に必ずしも依ることなく、直感性、土壌の空隙との関連、雨量の多寡の考慮など、それぞれの特性を生かして多角的視点から統合的に中期的な環境変動を評価することが適切であると考えられる。

次に、中心部のミズゴケ植生域の地点と各地点との地下水位の差の分布図例を図(4)-6 に示した。これより、北部域で水位レベルが相対的にやや高い傾向があること、西側のササ域は地下水位レベル・変動幅ともに大きいこと、南部水路付近のササ域は水位が高く変動が小さいことなどが明らかとなった。中でも南部水路付近の地下水位の動態については、本研究課題に先立つ同地域での研究課題から得られた成果を裏付けることとなった。



図(4)-5 2地点間の差の経年変化
(中心部のミズゴケ植生域の地点との差を植生クラス別に平均をとった)



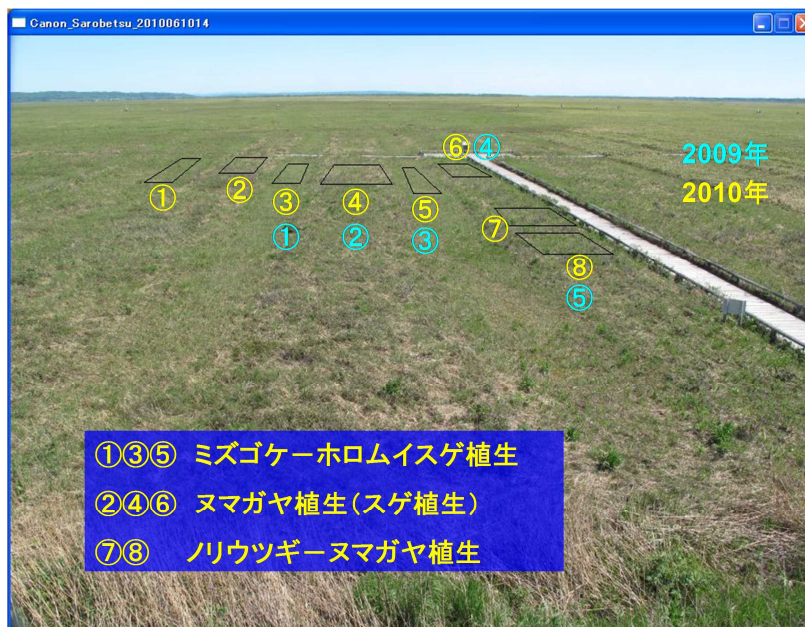
図(4)-6 2地点間の差の分布図例 (2010年)

(2) 自動撮影装置による植生フェノロジーの把握手法の検討

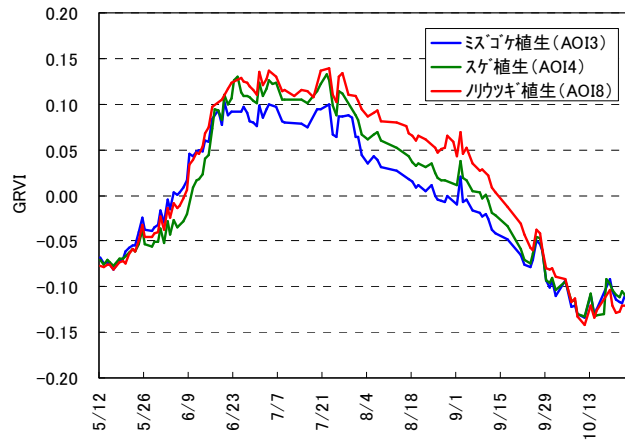
図(4)-7 に設定した解析範囲を示し、図(4)-8 に各指標値の季節変化の例として 2010 年の可視域カメラによる GRVI を示した。可視域カメラによる GRVI 及び 2G-RB、並びに近赤外域カメラによる NDVI 及び GRVI の時系列変化は、いずれも植生の変化に応じて良好な季節変化傾向を示し、開葉・枯葉時期の検出への本手法の有用性が示された。また開葉期間は短く、枯葉期間は長いという傾向が認められた。また各指標値はノリウツギ植生が最も大きく、次いでヌマガヤ植生（スゲ植生）、ミズゴケ・ホロムイソゲ植生の順となり、植生に応じた数値の差違が見られた。なお近赤外域カメラについては、波長感度特性から赤色のエネルギーが相対的に大きく、変動傾向を把握するのに活用できる可能性が示された。可視域カメラの GRVI は、9 月上～中旬に負の値に転じており、その時期に紅葉が進んだことがうかがわれた。

植生タイプ別に 2 年間の GRVI を比較したところ（図(4)-9）、開葉は 2010 年の方がやや遅いこと、7 月下旬から 8 月上旬は 2010 年の方が高い数値であること、枯葉はノリウツギで 2010 年の方がやや遅い傾向があることなどが示された。以上より、本手法により季節変化及び経年変化を把握することの可能性を明らかにすることができた。

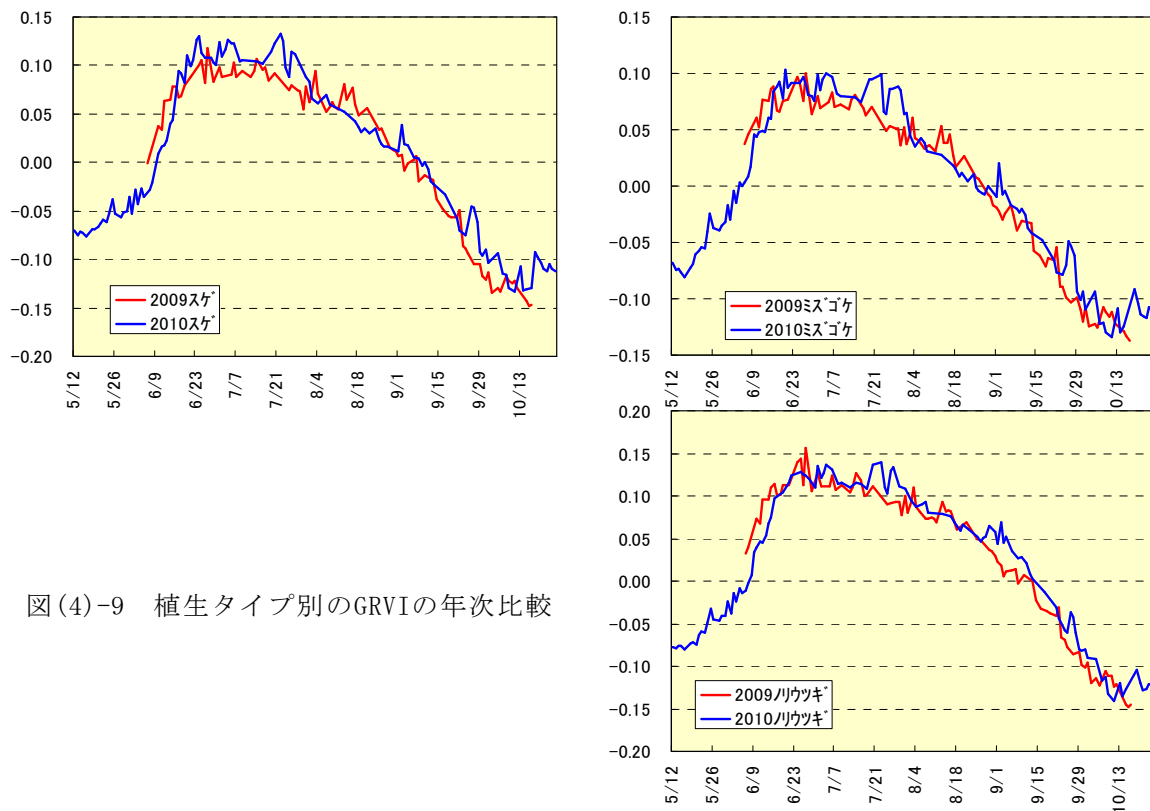
次に植生に対する水ストレスを検知する試みとして、各指標のレベルが一定と見なされた 6 月下旬から 8 月上旬を対象に地下水位との相関を調べた。その結果、「赤」は地下水位と負の傾向が、「近赤外」「GRVI」「緑」「2G-RB」は正の傾向が見られた。一般に、植物の活動が活発だと、「赤」をよく吸収し「緑」や「近赤外」をよく反射することが知られている。本研究の結果をこれに照らして考えると、乾燥時には赤色光の吸収が、近赤外光及び緑色光の反射が低下する傾向が示された（図(4)-10）。全ケースで概ね同じ傾向が示され、約半数のケースで寄与率 15～20% となった。これより、カメラを用いて乾燥ストレスを検知あるいはモニタリングできる可能性が示唆された。



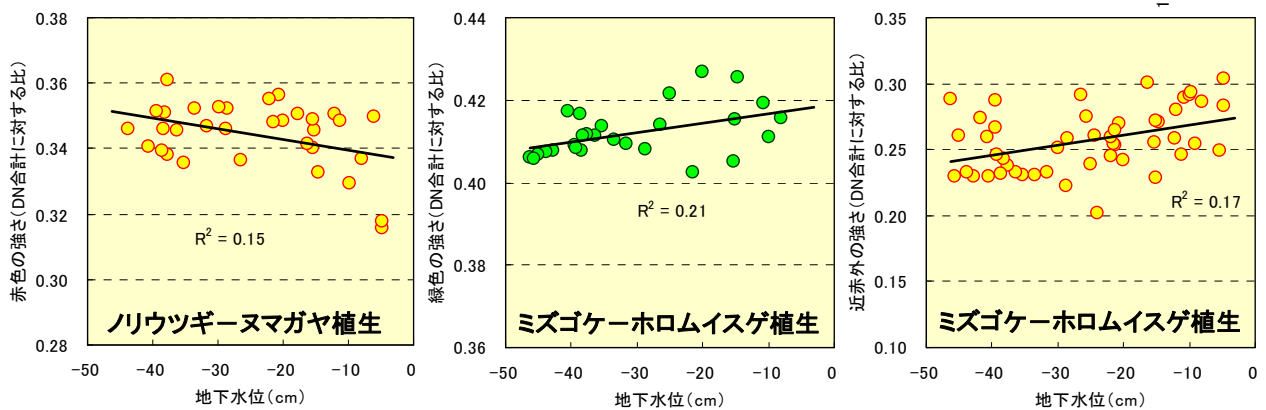
図(4)-7 解析範囲と植生タイプ



図(4)-8 可視域カメラによるGRVIの植生別変化 (2010年)



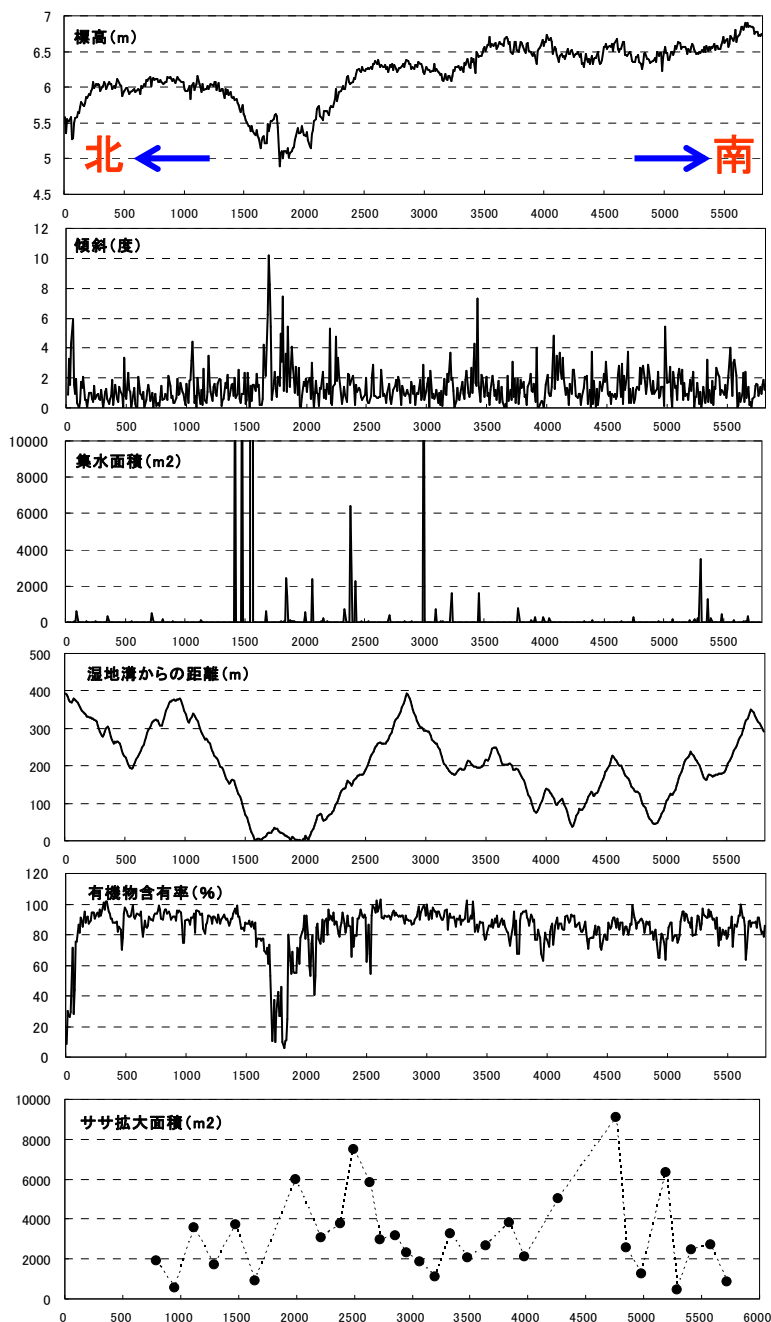
図(4)-9 植生タイプ別のGRVIの年次比較



図(4)-10 分光輝度値と地下水位との関係

(3) ササ前線の変動要因の解析と動態モニタリング手法の検討

2000年のササ前線における空間環境変動を図(4)-11に例示した。起点から1,500~2,000mのところは湿地溝が湿原中心部まで入り込んでおり、各項目ともに大きな変動を示した。起点から3,500m以降の南部域は北部域に比べて全体的に変動程度が小さかった。その原因は明らかではないが、南部では北部に比べて氾濫の影響を受けていることが知られ(大平 1995)³⁾、このような湿原の成立過程が関連している可能性もあり、今後の研究課題である。また0~14mの標高分布をもつ本地域の中で、ササ前線は比較的等標高に位置していた。起点から250mまでの変動は道路及び建物による地盤沈下の影響を強く受けていることが示された。



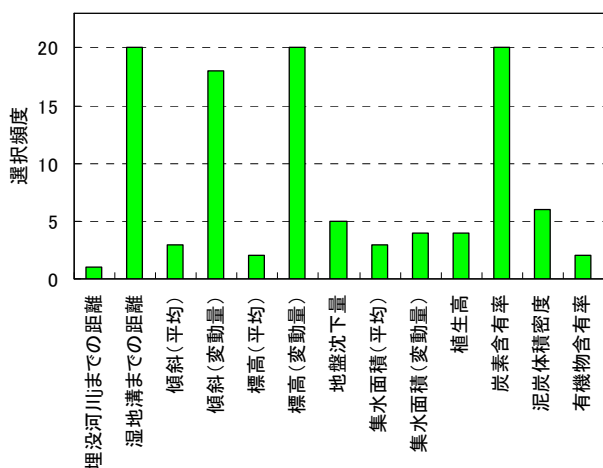
図(4)-11 ササ前線における環境変動

次に、全ての変数組み合わせで重回帰分析を行い、有意性の高い組み合わせの上位20ケースについて、選択された説明変数の頻度を図示するとともに(図(4)-12)、重相関係数が高い上位5ケースについて、各説明変数の標準化偏回帰係数とp値をまとめた(表(4)-1)。

その結果、湿地溝までの距離、標高(変動量)、傾斜(変動量)、表層土壌の炭素含有量が最も寄与していることが明らかとなった。湿地溝までの距離は排水路に近いほど、平均傾斜は傾斜が大きいほどササが拡大しやすいことを意味しており、地形とそれに伴う水の動きがササ拡大に寄与していることを明らかにした。重相関係数は概ね0.78、寄与率で60%となり、このことは今回用いた地理空間情報でササ拡大の約6割程度が説明されることを意味する。

以上のことから、広域的な環境因子がササの拡大に関連していることが示され、寄与が大きいものとして選択された因子は、水文との関係を顕著に示すものであり、ササの拡大と水文環境との関係を明らかにすることができた。水文因子は、時間変動が大きく(降雨・蒸発散・流出)、空間変動が小さい(緩慢)という特性がある。この水文因子の時間変動は微環境やササの生理生態に関連して短期的な動きに影響し、空間変動がササ群落の長期的な動態に影響している可能性があると考えられた。

次に UAV 撮影画像からササ前線を抽出した結果、空中写真による抽出と比較して、ミズゴケ植生側に入り込む形でずれが見られる箇所が生じた。これは UAV が低密度のササ検出が可能であり、密度の違いによる検出精度に由来するものと考えられた。この検出可能な密度の差を利用し両者を組み合わせることで、今後密度が増加する可能性の高い地域を抽出する手法になり得ることが示された。また、UAV 画像判読により、ササ植生のみならず、ヌマガヤ群落とホロムイスゲーミズゴケ群落との違いが判読できることがわかり、ササ前線の拡大に先んじてホロムイスゲーミズゴケ群落がヌマガヤ群落に変わるか否かを含め、今後の植生動態モニタリングの高精度化への可能性を示した。



図(4)-12 重回帰分析において選択された説明変数の頻度

表(4)-1 各説明変数の標準化偏回帰係数とp値

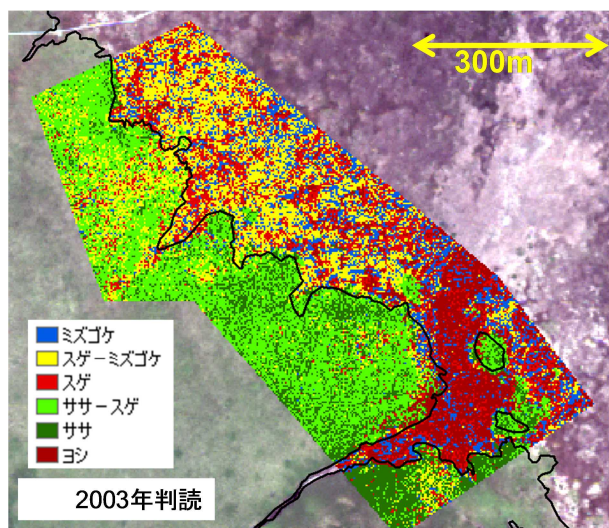
	標準偏回帰係数	p 値
湿地溝までの距離	-1.00~-1.03	0.000~0.001
標高(変動量)	-0.87~-1.06	0.001~0.003
傾斜(変動量)	0.79~1.04	0.003~0.009
地盤沈下量	0.16~0.17	0.343~0.380
集水面積(変動量)	-0.15	0.347
集水面積(平均)	-0.14~-0.15	0.360~0.391
表層土壌の炭素含有率	-0.96~-1.58	0.002~0.005
表層土壌の体積密度	0.40~0.53	0.278~0.406

(4) 高分解能衛星画像を用いた環境変動の推定手法の検討

判別分析による植生区分を行った結果、判別正答率は5月が65.9%、6月が68.2%、8月が73.6%と8

月が最も高い値となった。植生別に見ると混合植生で相対的に低い傾向を示した。また3時期の3バンドを組み合わせて植生判別を行った結果、概ね69～75%の正答率となり、多時期による判別精度の向上が見られた。以上より、精度の高い湿原植生区分図の作成ができることが明らかとなった。現地の植生は複雑であり、サンプルの植生区分ルールを一部見直すことで、より高い精度の判別モデルが構築できることが期待される。

5月の画像分析から得られた判別式を用いて、ササ前線域の一部において植生区分を行った結果、常緑であるササの特性が活かされササ前線が明瞭に示された（図(4)-13）。空中写真判読によるササ前線と比較して、ほぼ重なるとともに、2003年以降にササ植生が拡大している箇所も見出された。このことは、本衛星を用いることで、空中写真と同じ精度で、かつ再現可能な方法にてササ前線が抽出できることを示し、植生変化モニタリングへの適用可能性が高いことを表すものといえる。加えて、Pixel単位で植生判別することにより、ササの密度や他の植生とのモザイク状態に関する情報も得られ、植生動態や変化ポテンシャル評価への応用も期待される。

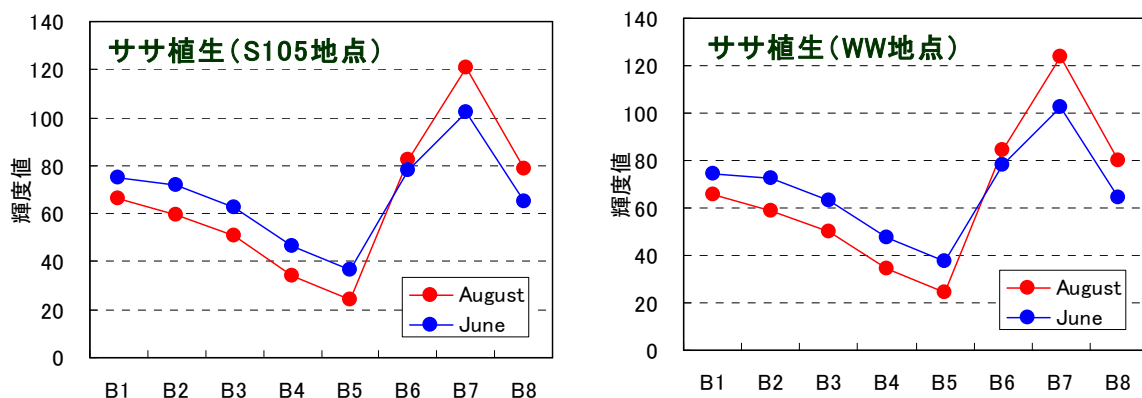


図(4)-13 ササ前線域における植生区分結果（5月）

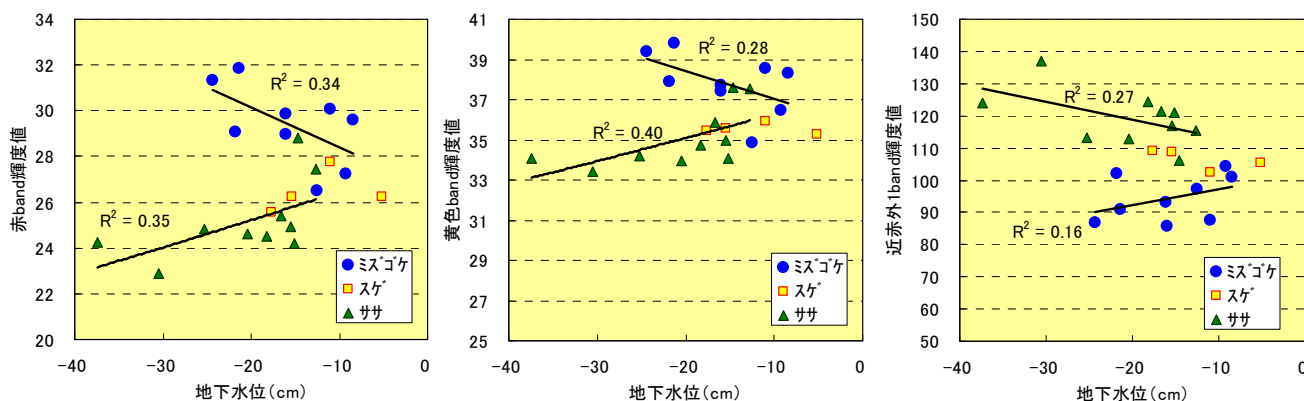
次に地下水位と輝度値の関係に関して、6月と8月で水位に差が見られた6地点について両時期のスペクトルプロファイルと比較した結果、スゲ植生の1地点で赤～近赤外でほとんど変化が見られなかったのに対して、ササ植生の5地点で水位の低い8月の方が赤をよく吸収し近赤外をよく反射している傾向が見られた（ササ植生における2地点の例を図(4)-14に示す）。これは生育が進んだ結果とも解釈できるが、水位が低下したことでより活発に生育している可能性もある。また同時期のミズゴケ植生のスペクトルプロファイルを地点間で比較した結果、水位が低いほど赤の吸収及び近赤外の反射がともに弱まる傾向が見られた。

さらに地下水位と輝度値との関係から、ミズゴケ植生では、水位が下がるほど黄色及び赤の吸収が弱まり、Red-Edgeより長波長では反射が弱まる、すなわち植物としての活性が低下している傾向が見られ、乾燥に強いササ植生は逆の傾向が見られた（図(4)-15）。この結果を即座に水ストレスと関係づけて議論することには慎重さを要するが、今後さらに研究を進めることにより、衛星画像による湿原植生の水ストレスに関する広域的な評価につながる可能性が示唆されたと考える。

以上より、多バンド高分解能衛星画像を用いて、判別分析による植生分類から、ササ前線の位置及び前線付近の植生分布が明瞭に抽出できることが明らかになったとともに、地下水位との関係分析から水ストレスと関係すると考えられる輝度値の動態が見出され、今後の生物多様性保全に向けた衛星リモートセンシングによる環境モニタリングへの有用性を示すことができた。



図(4)-14 ササ植生地点における2時期のスペクトル比較（6月：水位高い、8月：水位低い。可視赤がB2～5、近赤外がB7～8である）



図(4)-15 地下水位と輝度値の関係（8月）

(5) 大型野生動物（エゾシカ）の生息動向モニタリング手法の検討

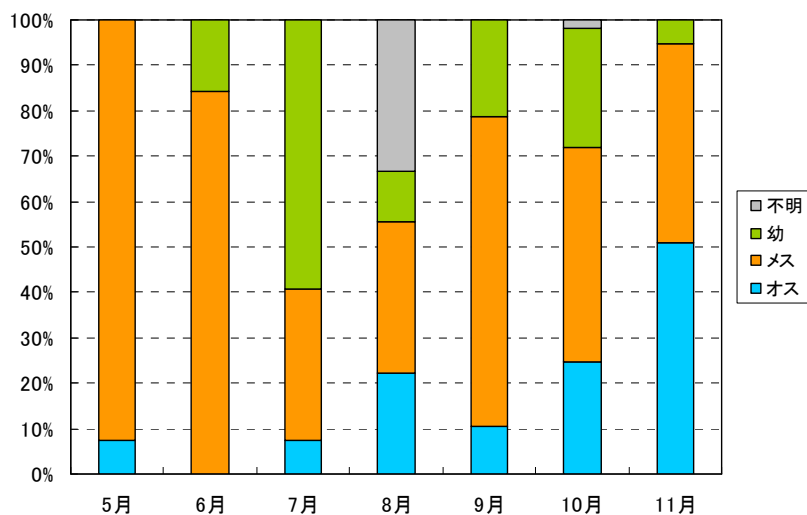
自動撮影装置を上サロベツ南部地域のシカ踏み道脇に設置した結果、2009年10～11月にオスが3回撮影された（図(4)-16）。このシカ道は東側の農地と西側の砂丘林及びペンケ沼の湿地林を結ぶものであり、オスがこの時期ここを移動していることが明らかとなった。しかしながら、自動撮影装置によるモニタリングにおいては、多くの機器が設置できない制約のもと、撮影箇所の実態性を評価することが現状では容易ではないと考えられることから、今後シカ移動のボトルネックとなる重要箇所等が明らかになれば、ピンポイントでのモニタリングへの活用が想定される。

次にエゾシカの見撃情報について、5月20日から12月4日まで88件のデータが得られた。図(4)-17にオス・メス・幼獣割合の月変化を、図(4)-18に全体及び地区別の目撃個体数の季節変化、図(4)-19に目撃個体数の時間帯変化を示した。構成の月変化を見るとオスは10月以降に多く、幼獣は7月に多い傾向が見られ、オスについては上述の自動撮影装置の結果と合致した。また幼獣についても

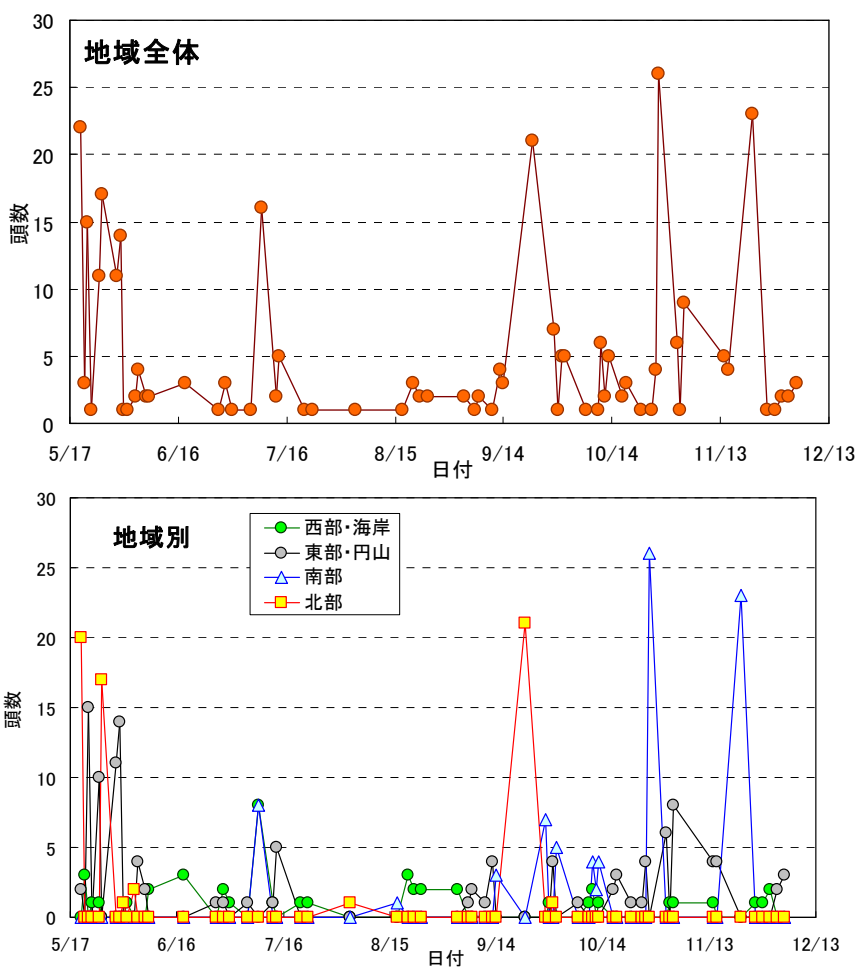
春の出産以降に増加するエゾシカの生活史と合致した。季節変化を見ると全体頭数については、春先と秋に多い傾向が見られ、夏場（6～9月）は湿原及び周辺を利用していないと考えられた。地区別では北（放水路以北）は春（及び9月）に、南（ペンケ沼周辺）は秋に、東（円山周辺）は春と秋に、西（砂丘林周辺）は比較的年間とおして、目撃頻度が高い傾向を示した。また時間帯変化を見ると15～18時に目撃頻度が高かった。本調査結果は特定の地点を定期的に調査する手法を取っていないため、調査地点及び日時のバイアスがかかっていることは否めないが、目撃報告に関わる人数を増やすことでより精度を高めることができ、エゾシカの分布及び湿原利用の全体的な傾向を把握するひとつの方法になり得るものと考えられる。



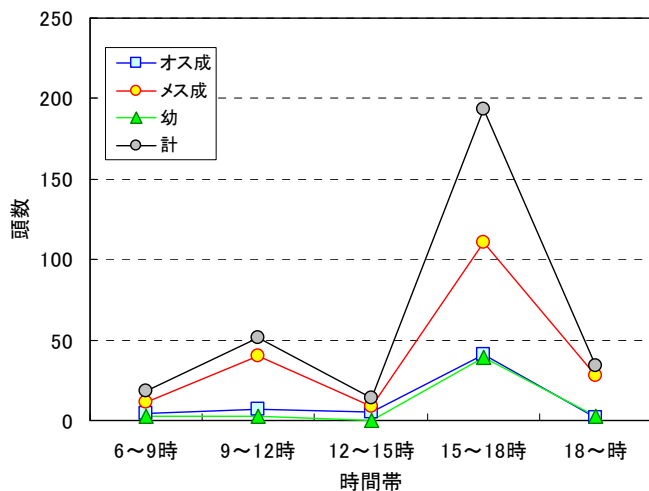
図(4)-16 自動撮影装置によるエゾシカ撮影画像例



図(4)-17 目撃されたエゾシカのオス・メス・幼獣割合の月変化



図(4)-18 全体及び地区別のエゾシカ目撃個体数の季節変化



図(4)-19 エゾシカ目撃個体数の時間帯変化

(6) 空中写真を用いた湖沼水位の経年変化の推測

1) 高解像度空中写真の整備と写真判読

本事業で整備した空中写真を図(4)-20に示す。このデータは2009年度及び2010年度に整備を行った。空中写真判読の結果から集計した開放水面面積を有する湖沼の数と面積の合計を表(4)-2に示す。



図(4)-20 購入した2009年撮影の空中写真

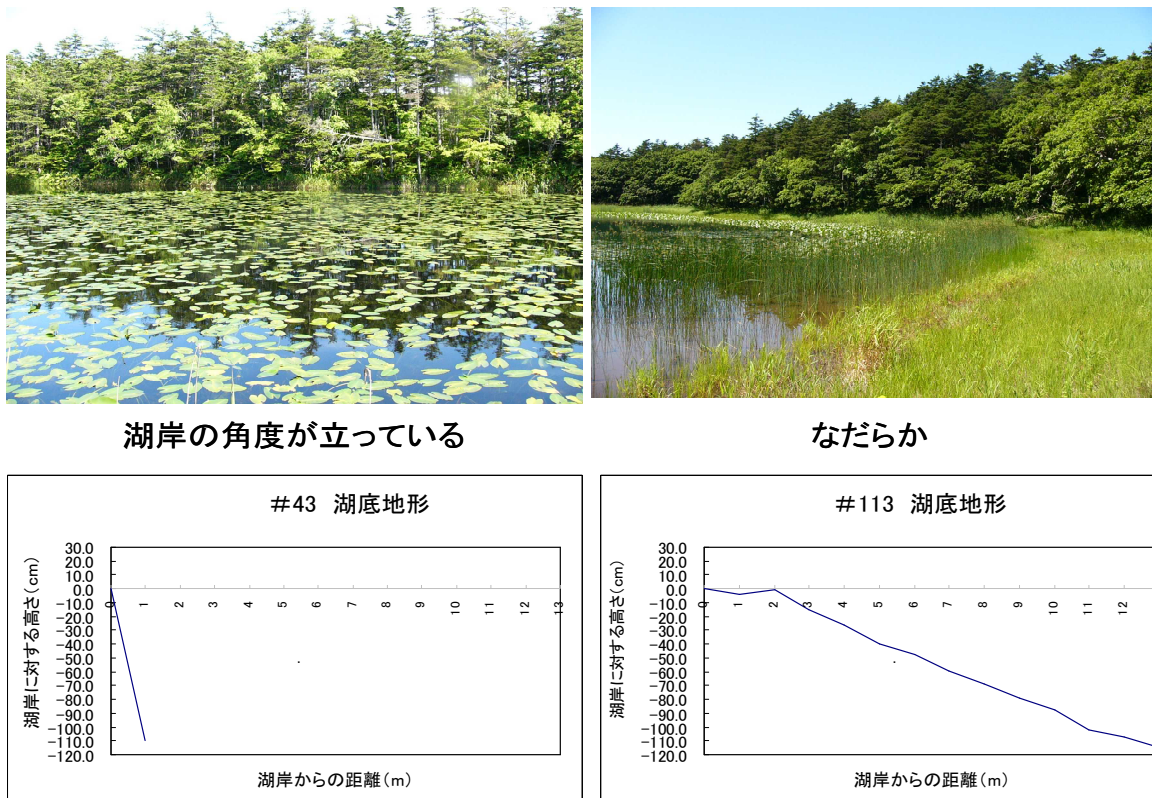
表(4)-2 空中写真の判読結果概要

	豊富町内		幌延町内	
	2005年	2009年	2005年	2009年
湖沼(開放水面)の個数	134	123	43	55
開放水面の面積合計 (ha)	167.5	157.0	26.6	16.8

2005年の空中写真と比較すると、2009年は湖沼の数は豊富町内に含まれる範囲では減少しており、幌延町内では増加していた。一方、開放水面面積の合計値はいずれも減少傾向にあった。幌延町内に含まれる湖沼の数が増加していたのは、開放水面面積の減少に伴って湖沼が分離等したものと思われる。ここで整備された空中写真は、本研究プロジェクトの基礎情報として随時使用された。

2) 湖岸地形の計測結果

湖岸地形の計測結果例を、図(4)-21に示す。ここでは湖岸が切り立っている例（左）と、緩やかな湖岸の例（右）を示す。



図(4)-21 湖岸地形の計測結果例

湖岸が切り立った湖沼の例では、1mの間に水深が110cm低下するが、緩やかな湖岸の例では、14mの間に約100cm低下する地形であった。湖岸の測量は合計8湖沼（北部2、中部3、南部3）において実施した。

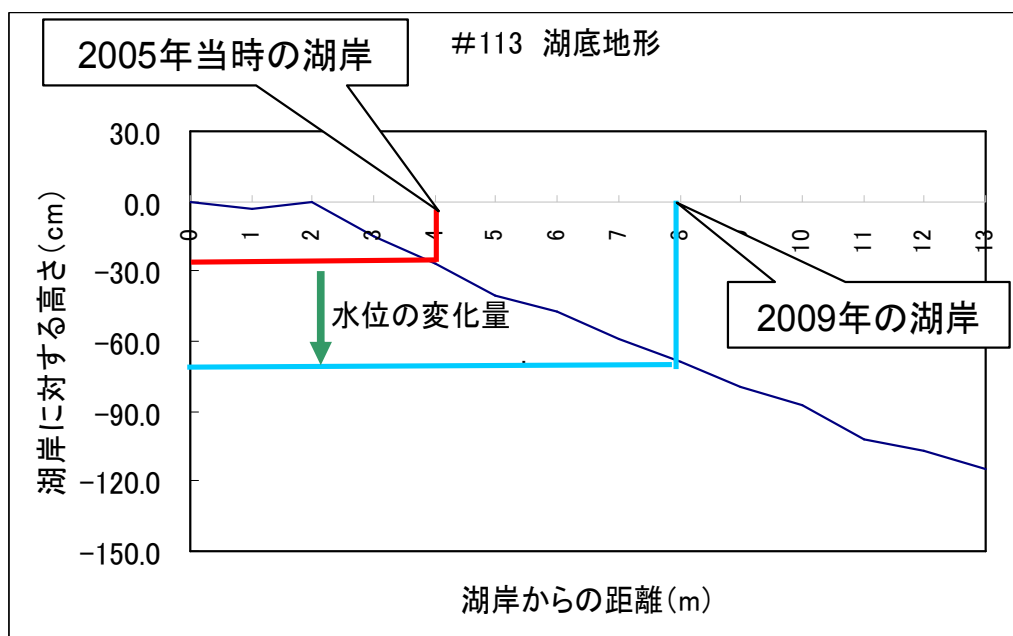
ここで得た地形計測の結果を元に、空中写真とGISを用いて水位を推測する例を図(4)-22、23に示す。図(4)-22では、赤線は2005年の空中写真から読み取った開放水面を、青線は2009年の空中写真から読み取った開放水面を示す。#113の開放水面は2005年のライン（赤）が、2009年のライン（青）よりも外側に位置し、ある程度の水位が低下しているものと思われる。そこで、この湖沼では、図(4)-23に示すように、それぞれの年代の湖岸（水際線）の位置関係から、水位の変化量を推測した。しかし、湖岸の傾斜が急勾配である（例：図(4)-21左図#43）場合には、空中写真判読の際に生じるわずかな誤差でも大きな変化と判断されてしまうため、この手法を用いるのは困難と考えられた。したがって、本手法を用いる際には以下のような湖沼を選択する必要があるといえる。

- ① 上空が疎開した箇所を選定し、GPS測位時の誤差を軽減する
- ② 湖岸の斜度が緩やかな地形を選択する
- ③ 可能な限り精密な地形計測を行う

この方法によって推測した水位を元に、1964年の水位を「0」とした際の、それぞれの年代での



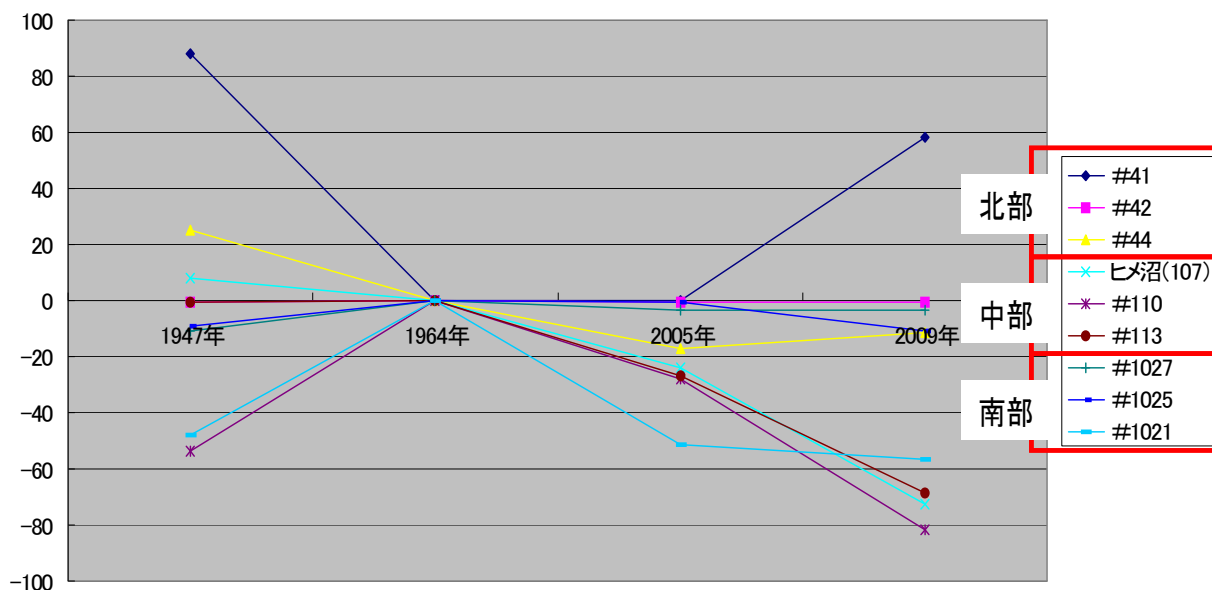
図(4)-22 空中写真から判読した開放水面の変化（#113の例）
 赤：2005年 青：2009年 背景：2009年空中写真



図(4)-23 #113の水位の変化量（2005-2009年）

水位変化を図(4)-24に示す。図(4)-24より、今回調査を行った北部の湖沼は1964年と比較しても大きな変化はなく、一部増加している湖沼もみられた。中部では1964年から一様に低下しており、南部では1964年と比較して変化なし（あるいは減少）という状況が確認された。

分散分析の結果を、表(4)-3に示す。分散分析の結果、湖沼の位置（北・中・南部）が湖沼の水位に影響を及ぼしていることが示唆された（ $P < 0.01$ ）。年代による影響は今回の結果からは見られなかった。今回の分散分析は湖沼のサンプル数が少なく、解析結果としては信頼性が低い可能性があるが、少なくとも、中部地域の湖沼の水位低下が大きいことが結果から示唆された。



図(4)-24 1964年を基準(0cm)とした水位の変化

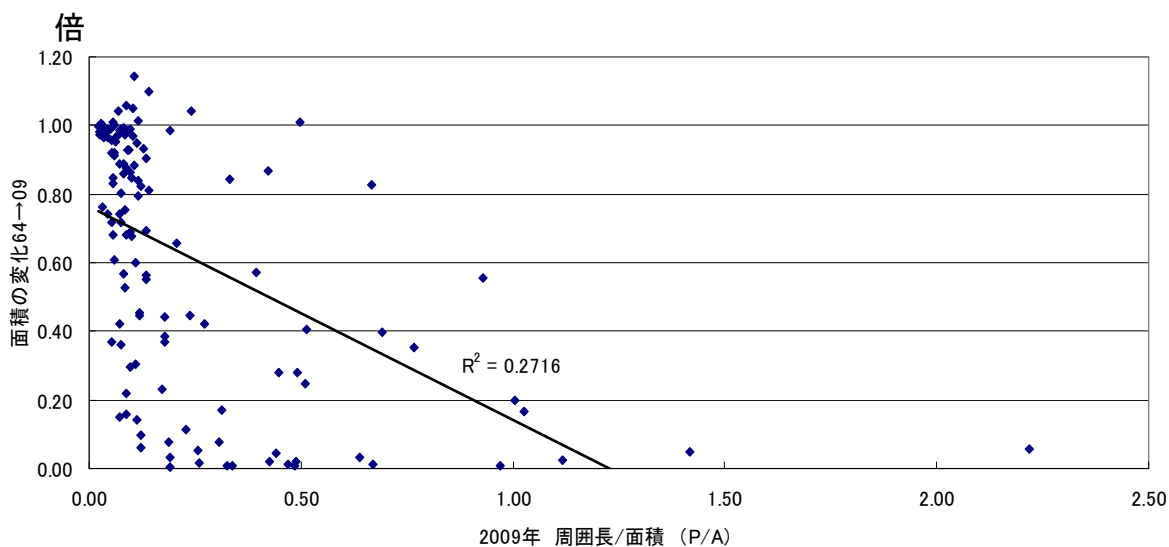
表(4)-3 分散分析の結果表

	Sum	Sq	F値	P値
湖沼の位置	9098.3	2	8.546	<u>0.0049</u>
年代	514.1	1	0.9659	0.3451
湖沼の位置 × 年代	369	2	3.4697	0.0647
R	6387.7	12		

(7) 今後特に監視が必要な湖沼・地域の抽出

1) 周囲からの影響の受け易さと水位低下の関係

P/A値と、1964年から2009年にかけての開放水面の変化との相関図を図(4)-25に示す。近時直線のR2乗値は0.27で大きくは無かったが、P/A値が大きくなると（周囲の影響を受け易くなると）、1964年と比較して開放水面が減少する傾向が見られた。特にP/A値が1.0を越えた場合、2009年の面積は1964年の面積の20%以下となっていたことが読み取れた。こうしたことから、周囲からの影響の受け易さは、湖沼開放水面面積の減少率に関連していると考えられた。

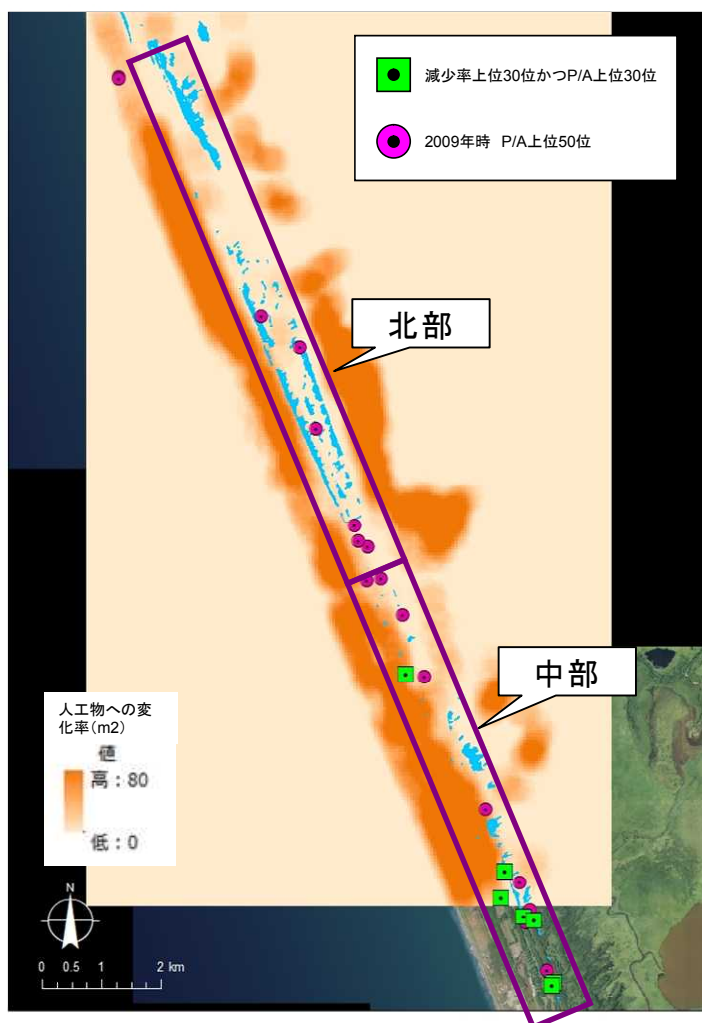


図(4)-25 P/A値と開放水面面積の変化率

2) 土地利用の変化率と今後のモニタリングの方針の検討

GISの近傍統計解析機能を用いて作成した土地利用の変化図と、開放水面面積の減少上位30位かつP/A値上位30位と、2009年のP/A値上位50位を図(4)-26に示す。なお、使用した土地利用図は幌延町が含まれていないため、ここでは北部と南部のみの解析結果を示す。図(4)-26は、1964年から土地利用が大きく変化した箇所が濃い色で示されている。この図より、開放水面面積が大きく減少し、且つ、P/A値が大きいと判断された湖沼は中部地域に集中しており、北部地域では見られないことがわかる。さらに、こうした中部の湖沼の周辺は、人工物に土地利用が大きく変化した箇所に隣接していることも示された。これらのことから、人工物への土地利用変化率が大きい地域で、かつP/A値が大きい湖沼は、開放水面面積の減少や消失の危険性が高いことが予測される。

そこで、2009年現在のP/A値の上位を重ねてみると、該当する湖沼が北部と中部の境界付近と、中部に多く見られた。今後、図(4)-26に示される土地利用変化の大きい地域の、P/A値の上位に含まれる湖沼は注意深く監視を行っていく必要があると考えられた。この手法は「広く浅く」現況を診断するものである。この手法により異常が認められた場合や注意すべき状況が認められた場合には、実際の調査に進むという手順に応用可能である。



図(4)-26 土地利用図の変化率

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- これまでサロベツ湿原におけるササの拡大要因は水位低下であると考えられていたことに対し、広域的・面的なデータを用いて解析した結果、湿原内での地下水流動なども植生に大きな影響を与えていることを示した。
- さらに空中写真や衛星画像の解析結果に、UAVデータを組み合わせることで今後密度が増加するポテンシャルを評価する可能性を示すことができたことは、リモートセンシング技術による環境変動の把握に寄与した。
- 湿原水位の経年的な変化傾向を評価する手法が考案された。この手法によって、長期観測が特に必要な事象（気候変動が湿原生態系に及ぼす影響など）の評価が可能となった。
- 市販のデジタルカメラ画像から植生の季節変化を監視する方法が構築された。また、グランドベースから衛星に至る空間階層的な植生モニタリング手法が提示された。
- 多バンド高分解能衛星を用いて環境（植生及び水ストレス）変動をモニタリングすることの有用性を提示できた。

- ・ 目撃情報を集積し分析することで、簡易にエゾシカの分布及び湿原利用の全体的な傾向を把握する手法を示すことができた。
- ・ 空中写真を用いた湖沼水位の変化傾向を把握する方法を確立し、GISの機能を応用して今後の監視システムについて提案を行った。

(2) 環境政策への貢献

環境省の自然再生事業に対して、広域的な観点から、今後優先的に行うべきモニタリング事項（水文と植生）とその技術的な手法を提示することができた。また、本研究を通じて得られた科学データと、開発された評価及びモニタリング手法は、汎用的技術として、サロベツ湿原のみならず、今後自然再生への取り組みが見込まれる他の湿原生態系の保全と修復に対しても、効果的な知見を提供することが期待される。特に衛星画像及び定点カメラの活用については、生物多様性評価など、応用性の高い新たな技術としての成果が提示できた。なお、これらの成果は本地域を管轄する環境省関係者にも提供され活用が図られているところである。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. Takada, T. Inoue, Y. Mishima, H. Fujita, T. Hirano, Y. Fujimura: Journal of Landscape Ecology (in press)

“Geographical assessment of factors for Sasa expansion in the Sarobetsu Mire, Japan.”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 高田雅之、平野高司、井上 京：2009年度水文・水資源学会（2009）
「泥炭地湿原における水文変動による蒸発散量の推定」
- 2) 高田雅之、井上 京、三島啓雄：第18回地理情報システム学会（2009）
「地理空間技術を用いた湿原環境の平面的構造の推定」
- 3) 永嶋良之、星野仏方、高田雅之、谷 宏：第28回日本写真測量学会北海道支部（2010）
「サロベツ高層湿原におけるササの分布域拡大に関する研究」
- 4) 高田雅之、井上 京、富士田裕子、三島啓雄：農業農村工学会（2010）
「サロベツ湿原におけるササ分布拡大要因の地理空間的解析」

- 5) Takada, M., Inoue, T., Mishima, Y. : International Conference in Landscape Ecology (2010)
「Spatial structure evaluation for environmental factors in the Sarobetsu peatland, Japan」
- 6) 鈴木 透、高田雅之：第21回日本景観生態学会（2011）
「湿原の景観構造が鳥類へ与える影響」
- 7) 高田雅之、井上 京：2011年度水文・水資源学会（2011）
「高層湿原における地下水位低下の評価方法」
- 8) 高田雅之、井上 京、平野高司：農業農村工学会（2011）
「サロベツ湿原における泥炭中の炭素蓄積量とその空間分布推定」
- 9) 武地遼平、井上 京、高田雅之：農業農村工学会（2011）
「平坦な泥炭湿地における流路を通じた流出」
- 10) 高田雅之、小熊宏之、井手玲子、丹羽 忍：第3回日本湿地学会（2011）
「デジタルカメラによる湿原環境のモニタリング」
- 11) 武地遼平、井上 京、高田雅之：第3回日本湿地学会（2011）
「サロベツ湿原における流路を通じた流出について」
- 12) 高田雅之、齋藤健一、三島啓雄、井上 京：平成23年度日本写真測量学会（2011）
「多バンド高分解能衛星画像World View-2の湿原環境評価への適用可能性」
- 13) 高田雅之、立木靖之：日本生態学会第59回大会（2012）
「湿原・湖沼生態系のマルチスケールモニタリング方法」

（3）出願特許

特に記載すべき事項はない

（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

8. 引用文献

- 1) 富士田裕子・加納佐俊・今井秀幸. 2003. 上サロベツ湿原時系列ササ分布図の作成とササの面積変化. 北大植物園研究紀要 3: 43-50.
- 2) Takada, M., Mishima, Y., Natsume, S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. Landscape and Ecological Engineering, 5(1): 45-58.
- 3) 大平明夫. 1995. 完新世におけるサロベツ原野の泥炭地の形成と古環境変化, 地理学評論 68A-10: 695-712.

Development of a Monitoring System for a Mire/Pond Ecosystem using Sarobetsu Mire and Wakasakanai Coastal Dune Mire as Models

Principal Investigator: Hiroko FUJITA
Institution: Field Science Center for Northern Biosphere
Hokkaido University

Cooperated by: Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, Hokkaido University of Education Hakodate, Suiko-Research Co. Ltd., National Institute for Rural Engineering, EnVision Conservation Office, Hokkaido Institute of Environmental Science

[Abstract]

Key Words: Palaeoecology, Community-environment relationships, Hydrology, GIS, Remote sensing

To develop a monitoring system for freshwater wetlands, we launched a series of studies in 2009 using Sarobetsu Mire and Wakasakanai Coastal Dune Mire as model case study areas. Major results were as follows.

^{14}C dating of sediment cores showed that dunes had developed since 5700cal yr BP. Pollen analyses showed that the timing of change from herbaceous vegetation to *Quercus* forest differed from one site to another but that from *Quercus* forest to *Abies* forest was simultaneous. The latter change was attributed to cooling trend in Late Holocene. Chironomid assemblages at three study sites showed unique changing pattern among sites, indicating that the site environment had changed independently to one another.

Vegetation and benthos assemblages were studied in Wakasakanai Sand Dune Mire. Fourteen types of vegetation communities were described and they could have been primarily regulated by water level. Drawdown had caused disappearance of species such as submerged and floating-leaved plants (e.g. *Utricularia* spp. and *Nuphar* spp.). Thirty five taxa of 28 benthos families were recorded and the benthos assemblages were classified into three types. Distribution of those types corresponded to site environment such as sediment type and presence/absence of aquatic macrophyte.

Hydrological environment was analyzed in Wakasakanai Sand Dune. ^{222}Rn analysis revealed that inflow to the lakes consisted of precipitation but no/little groundwater. Relationship between ^{18}O and deuterium delta values in lake water showed that lake water evaporated significantly. Open water areas and depth of lakes accounted for evaporation ratios which varied from 14.4 to 71.9 with an average of 45.1%. Heat balance model to simulate lake temperature was developed and appropriate estimation for

evaporation ratio was calculated using vaporization heat. Water chemistry showed that groundwater in dunes discharged into side ditches bordered by pastures, supporting the hydraulic gradients across the dunes that were estimated topographically. Discharges through natural/artificial ditches were estimated to be 21-43% of precipitation from May to October in 2011 in Wakasakanai Sand Dune whereas 29-41% from July to November in 2010 in Sarobetsu Mire.

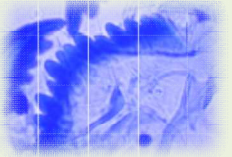
Spectrometry analysis using general digital camera was confirmed to be able to monitor the vegetation phenology. Comprehensive interpretations were provided for multi-scale monitoring of *Sasa* distribution that included ground-truth data, photos by radio control helicopter, aerial photos, and satellite images. Evaluation methods for hydrological aspects of peatland over years/decades were proposed. Lakes needed to be carefully monitored were indicated by air-photo interpretation.

サロベツ湿原と稚咲内湖沼群をモデルにした 湿原・湖沼生態系総合監視システムの構築

湿原・湖沼生態系の理解

生態系形成過程の解明

- 5700年前: 砂丘形成開始
- 1200-700年前:
広葉樹→針葉樹に変化
(寒冷化の影響か)
- 各湖沼は個別に発達遷移



方法: 堆積物中のユスリカ幼虫化石(上図)や花粉化石の分析による

植生・生物群集の現状把握



植生: 14タイプ(湖沼植生タイプ、高層湿原タイプ、低層湿原タイプ、等)

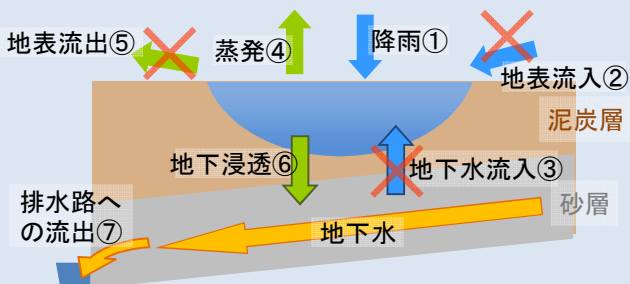
底生動物: 3タイプ

- 湖底が砂質タイプ
- 湖底が有機質かつ抽水植物が多いタイプ
- 湖底が有機質かつ抽水植物が少ないタイプ

面積が減少した湖沼の植生

- 異質な群落や外来種の繁茂などはない。

水文環境の実態把握



- 雨水涵養①(地表流入・地下水流入≒0 ②③)
- 蒸発散量=雨量の10~60% ④
- 砂丘帯地下水を湖沼が涵養⑥

(人為的影響 ↓)

- 砂丘帯地下水は、西側排水路に流出⑦
- 空中写真判読では、2005年→2009年に11湖沼が消失、合計10.5haの湖沼面積減少

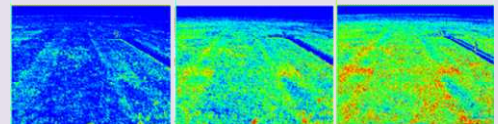
生態系監視・評価の技術開発

中距離リモートセンシング

植生季節変化の把握



NDVI(正規化植生指数)



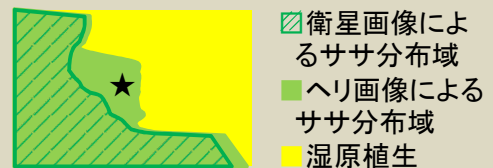
ラジコンヘリ搭載カメラ画像



時間的・空間的 マルチスケールデータの統合

各データの特性を踏まえることで
変化の予兆把握が可能

〈異なる空間スケールデータを用いた
湿原でのササ分布域の解析例〉



- ★域はササ拡大ポテンシャルが高い。
- ★域の衛星画像特性把握により、ササ拡大ポテンシャルの広域評価が可能