

携帯型電導度測定機器の開発と湿原環境調査への適用

その他（別言語等） のタイトル	Development of Portable Electrical Conductivity Measuring Instruments and Its Application to Environmental Survey in Wetlands
著者	高橋 宣之, 河内 邦夫, 矢部 和夫, 中村 隆俊, 後藤 典俊
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	54
ページ	137-145
発行年	2004-11
URL	http://hdl.handle.net/10258/74

携帯型電導度測定機器の開発と湿原環境調査への適用

その他（別言語等） のタイトル	Development of Portable Electrical Conductivity Measuring Instruments and Its Application to Environmental Survey in Wetlands
著者	高橋 宣之, 河内 邦夫, 矢部 和夫, 中村 隆俊, 後藤 典俊
雑誌名	室蘭工業大学紀要
巻	54
ページ	137-145
発行年	2004-11
URL	http://hdl.handle.net/10258/74

携帯型電導度測定機器の開発と湿原環境調査への適用

高橋 宣之^{*1}, 河内 邦夫^{*2}, 矢部 和夫^{*3}, 中村 隆俊^{*4}, 後藤 典俊^{*5}

Development of Portable Electrical Conductivity Measuring Instruments and Its Application to Environmental Survey in Wetlands.

Nobuyuki Takahashi, Kunio Kawauchi, Kazuo Yabe, Takatoshi Nakamura and Noritoshi Goto

(原稿受付日 平成 16 年 5 月 17 日 論文受理日 平成 16 年 8 月 31 日)

Abstract

In order to rise the efficiency of measuring the water quality in wetlands, we developed an electrical conductivity (EC) measuring instrument that is exclusive use for wetlands. EC of the ground water is reflected ion concentration, it is used for a rough index of the water quality. From the experiment results in wetlands, we found that EC of peat ground had a close relation to EC of ground water, and that we can roughly grasp differences or a changes of the water quality in wetland using this method.

Keywords : Water quality, Environmental survey, Electrical exploration, Electrical conductivity.

1 はじめに

1993 年に釧路で開催されたラムサール条約第 5 回締結国会議を契機に、我国でも湿原の価値が見直されるようになった。近年、釧路湿原自然再生事業に代表されるように、湿原を積極的に保全・再生しようとする動きが活発化している。

湿原の保全・再生を考えるためには、湿原の現況を把握する調査が不可欠である。特に植生と水質を把握することが、保全策を立案する上で重要な鍵となる。なぜなら、人為的な水質汚染が湿原の植生に影響を与えている事例が報告されているからである⁽¹⁾⁽²⁾。

初期段階の調査においては、湿原全体の水質や植生を大まかに把握する作業が行われる。広大な湿原の植生分布を効率良く調査する手法としては、リモートセンシングの衛星画像解析による研究例があるが⁽³⁾⁽⁴⁾、広範囲の水質を効率よく調査する手法は未だ開発されていない。

水質を概略的に評価する指標としては、一般に電導度が用いられている。電導度は水に溶存する

*1 博士後期課程建設工学専攻

*2 材料物性工学科

*3 札幌市立高等専門学校 環境デザイン専攻科

*4 日本学術振興会特別研究員

*5 情報工学科

イオン総量に比例して変化する物理量である。現在の湿原調査では、一測定箇所毎に地下水を採取し、電導度を測定する手法が用いられており、調査に多大な時間と労力を要している。

このような背景から、筆者らは湿原における水質調査の効率化を目指して、電気探査を用いた湿原の水質環境調査法の構築に関する研究を行ってきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

本論文では、筆者らが開発した湿原調査用電導度測定機器の適用事例と、それを用いた新しい水質環境調査法の有効性について報告する。

2 測定原理

2.1 Wenner 法の測定原理

本研究では、湿原の電導度を電気探査比抵抗法の理論に基づき測定した。電気探査比抵抗法には様々な手法があるが、ここでは湿原を極力傷めないように配慮し、最も狭いスペースで測定が可能な Wenner 法を採用した。Wenner 法の電極配置図を図 1 に示した。

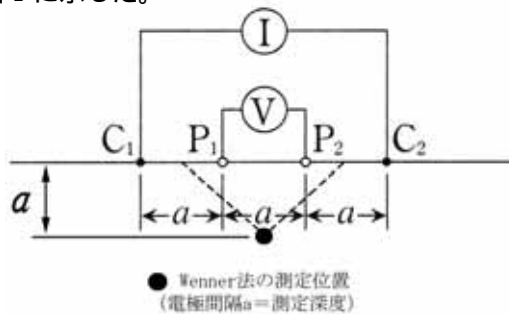


図 1 Wenner 法の電極配置図

Wenner 法は電流電極 C1,C2 と電位電極 P1,P2 を地表面に等間隔に設置する方法である。この時 C1,C2 間に流した電流値 $I(A)$ と、それに伴い P1,P2 間に発生する電位差 $V(V)$ を測定し、これらの値から地盤の比抵抗を計算する。測定位置は P1,P2 の中点直下の深さ $a(=$ 電極間隔)の位置と定義されており、電極間隔を変えることで、任意の深さの比抵抗を測定することができる。

Wenner 法の比抵抗は式(1)によって表される。

$$\rho = 2 \pi a(V/I) \quad (1)$$

ここに、 ρ は比抵抗($\Omega \cdot m$)、 a は電極間隔(m)、 I は電流値(A)、 V は電位差(V)である。

式(1)は地盤が比抵抗 ρ の均質な地下媒質によ

って構成される場合に成立する関係である。しかし、自然界に存在する地下媒質は一般に不均質なため、式(1)から得られる値は実際には地盤の真の比抵抗を示さない⁽⁷⁾。この値は、真の比抵抗と区別して見掛け比抵抗 と呼ばれる。図 1 で測定されるのは、見掛け比抵抗 である。

見掛け比抵抗は測定位置の比抵抗を直接表すものではない。しかしながら、この値は地下の比抵抗分布を反映したものであり、電極周辺のかなり広い範囲の比抵抗の一種の平均値と考えることができる⁽⁸⁾。すなわち、本研究で測定した見掛け比抵抗は、湿原の地盤を構成する地下水、有機物および土粒子の全ての比抵抗を反映した値であると言える。

見かけ電導度 EC' は、見かけ比抵抗 ρ' から式(2)によって求められる。

$$EC' = 1/\rho' \quad (2)$$

ここに、 EC' は見かけ電導度(S/m)、 ρ' は見かけ比抵抗($\Omega \cdot m$)である。

2.2 Archie の関係

Archie は、地層が間隙水で完全に飽和されている場合、地層の比抵抗 ρ_s は、間隙水の比抵抗 ρ_w に比例するとし、式(3)と式(4)を導いた⁽⁹⁾。

$$\rho_s = F \rho_w \quad (3)$$

$$F = A \rho_w^{-m} S^{-n} \quad (4)$$

F は地層係数と呼ばれる地層固有の係数であり、孔隙率 ϕ 、水飽和率 S といった土質パラメータと地層に応じて決まる定数 A, m, n で表される。

ここで、地層の電導度 EC_s と間隙水の電導度 EC_w を考える。式(2)に基づくと、それぞれ $EC_s = 1/\rho_s$ と $EC_w = 1/\rho_w$ の関係式が得られ、これらを式(3)に代入すると、式(5)が成り立つ。

$$EC_w = F \times EC_s \quad (5)$$

ここに、 EC_w は間隙水の電導度(S/m)、 EC_s は地盤の電導度(S/m)、 F は地層係数である。

式(5)と同様に EC_w と EC_s の間に比例関係が成り立てば、Wenner法で得られた地盤の見かけ電導度から間隙水の電導度を推定することが可能である。

2.3 電導度の温度補正

電導度は温度によって変化する。飽和土の電導度にも温度依存性が認められ、測定値を比較検討する上で温度補正が重要であることが指摘されている⁽¹⁰⁾。同じ温度条件で現場測定を行うのは不可能なので、通常は測定値を基準温度の電導度に換算する方法がとられる。基準温度は25とするのが一般的である。本研究ではJIS K0101 に従い、Wenner法で得られた見かけ電導度を温度補正した。JISによると、電導度は1の温度上昇で約2%大きくなるとしている。これに従って温度補正式を構成すると、式(6)のようになる。

$$EC_{25} = EC_t / \{1 + 0.02 \times (t - 25)\} \quad (6)$$

ここに、 EC_{25} は25の電導度(S/m)、 EC_t は t の電導度(S/m)、 t は温度()である。

3 湿原用電導度測定機器の開発

今回開発したのは、湿原の電導度を異なる深度で測定するための携帯型測定機器である。測定機器の開発にあたっては、足元の悪い湿原内の調査を効率良く迅速に行えるように、小型化・軽量化に努めた。

湿原は泥炭や粘性土等の軟弱地盤で構成されており、その上にヨシ・スゲ・ミズゴケ等の湿性植物が繁茂している条件にある。このため、普通地盤と比較して電極の挿入・設置は容易であるが、地盤が極めて軟弱なため、一般に使われている重い金属性電極を自立させることが難しい。以上の点を考慮し、湿原調査用の電極と電気探査器を試作した。湿原調査用電極の構造を図2に示す。

電極のボディには、軽量で強度の高い塩化ビニール管を用いた。機動性を高めるために、ボディと電極の一体型構造とした。湿原調査用電極の総重量は約1kgである。電極には先端部を尖らせた銅管を用いた。銅管の長さは電極の自立性を考慮して10cmとした。塩化ビニール管と銅管は安価で入手も容易であるため、現場で電極が破損した場合でも修復が可能である。

今回開発した電極の特長は、塩化ビニール管に7本の電極を0.2m間隔で固定したことで、深度0.2mと0.4mの測定を一度に行える点である。また、2本の補助電極を用いて深度0.8mの測定も簡単に行える。各深度の電極パターンは図2に示す

とおりで、ボディ中央部に取り付けた切替スイッチによって使用する電極を切り替える構造とした。なお、深度0.2mの見かけ電導度を水平方向に4点測定する仕組みとしたのは、4点の平均値をとることによって、地表面の起伏に起因する測定誤差を平滑化するためである。

湿原用電極に接続する電気探査器には、接地抵抗器(日置電機株式会社 EIRTH TESTER 3150)をベースに筆者らが開発した4極の交流電気探査器(図3参照)を用いた⁽¹¹⁾。寸法は12cm×16.5cm×7cmで、総重量は約0.5kgである。この測定器は、抵抗測定目盛とゼロ表示検流計から構成される。測定では、電流値I(A)と、検流計が0を示す時の抵抗値R()を読み取る。測定レンジは1~1000である。

電気探査器を、標準抵抗器(横河電機株式会社 TYPE2786)によって検定した結果、測定誤差は3%以内に収まっており、実用するのに十分な測定精度を有していることを確認した。

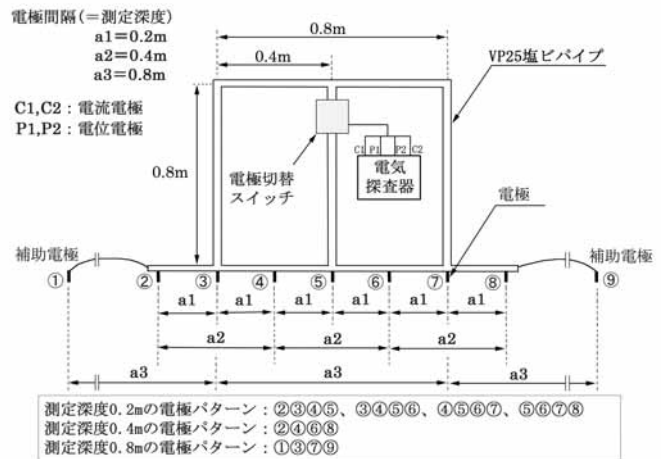


図2 湿原調査用電極の構造



図3 電気探査器の外観

4 測定機器の適用実験

4.1 実験地の概要

本研究で開発した湿原用電導度測定機器を用いて、実際の湿原で適用実験を行った。

実験フィールドには、北海道登別市にあるキウシツ湿原を選定した(図4)。キウシツ湿原(北緯42°28'、東経141°9'、標高3~7m)は、JR室蘭本線幌別駅から南西約3kmの海岸平野部に位置する面積0.02km²程の湿原である。キウシツ湿原は丘陵縁の谷頭部に位置するため、丘陵下縁部から湧水が常時供給される条件にあり、湿原の地下水位は安定している⁽¹²⁾。

キウシツ湿原では、植物絶滅危惧種・危急種を含む総数75科195属284種(含む帰化植物24種)の野生植物が確認されている⁽¹²⁾。近年、登別市によって湿原保全の方針が打ち出されており、現在保全に向けた調査・検討が行われている。

4.2 調査方法

キウシツ湿原内の西側に120m×120mの調査範囲を設定し、以下に示す各項目について調査した。測定位置図を図5に示した。調査範囲の標高は、B付近で6.54mと最も高く、地表面は南東方向へ緩やかに傾斜している。調査範囲の最大比高は2.68mである。また、C付近に湧水があり、湿



図4 キウシツ湿原の位置図

原へと流入している。東西方向のラインと南北方向の1ラインには深さ約1mの排水路があり、湿原の地下水はこれらの排水路に流出している。

(1) 湿原の見かけ電導度

本研究で開発した測定機器を用いて、湿原内の深度0.2mおよび0.4mの見かけ電導度を、メッシュの交点上で測定した。メッシュ間隔は一律15mとした。また、深度0.8mの見かけ電導度を、図5の印の位置で測定した。

(2) 地下水の電導度

湿原の見かけ電導度と地下水の電導度の関係を明らかにするために、ポータブル電導度計(東亜電波工業株式会社CM-14P)を用いて、地下水の電導度と水温を測定した。CM-14Pには温度補正機能が備わっており、測定値は水温25°相当に換算された電導度を示す。測定には、メッシュの交点に予め設置した観測孔を利用した。観測孔の構造を図6に示す。観測孔は有孔区間の違いによってAタイプとBタイプの2種類設置されている。Aタイプの観測孔には深度0.1~0.3mからの地下水が、Bタイプの観測孔には深度0.7~0.8mからの地下水が流入する構造となっている。

5 調査結果と考察

5.1 キウシツ湿原の電導度分布

湿原には胸高ほどのヨシやスゲが繁茂しており、やや移動しにくい条件であったが、今回開発した測定機器を用いて、効率良く調査を行うことができた。約80カ所の測定に要した時間は5時間程度である。また、測定機器の総重量を約1.5kgに抑



図5 測定位置図

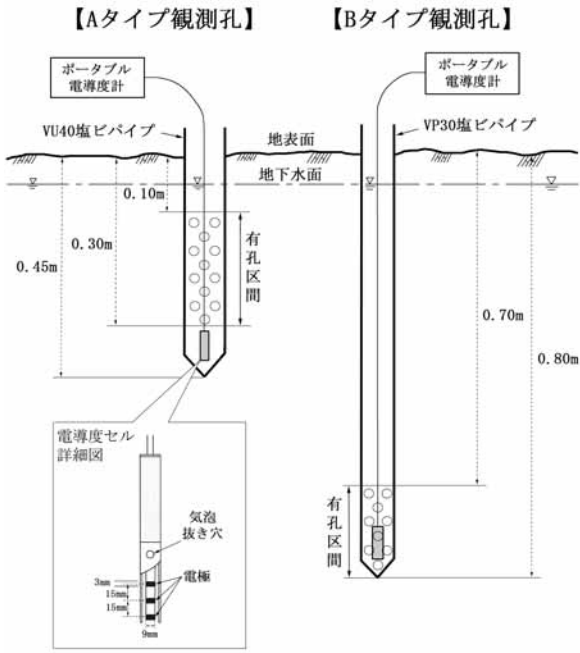


図6 観測孔の構造

えたため、調査員への負担も軽減できた。

1999年5月2日、12月5日、2000年4月7日および5月4日の見かけ電導度と地下水の電導度分布図を図7に示す。いずれの電導度も、式(6)によって温度補正した値である。

東西方向のライン別に見ると、Wenner法で測定した深度0.2mと0.4mの見かけ電導度は、湿原北側のラインとライン間の範囲で高い傾向にあった。特に最も北に位置するラインの電導度は概ね50mS/m以上を示し、ライン方向へかけて次第に低くなっていた。これに対して、湿原南側のラインとライン間の電導度は概ね11~17mS/mの範囲に収まっており、湿原北側と比較し相対的に低い値を示した。

南北方向のライン別に見ると、Gラインの電導度が他のラインと比較して3~6mS/m高かった。このような電導度分布の特徴は、Aタイプ観測孔で測定した深度0.1~0.3mの地下水、深度0.8mの見かけ電導度およびBタイプ観測孔の電導度分布にも同様に認められた。深度0.8mの分布図のコンターがなめらかなのは、測定を行わなかった交点の電導度を比例配分で補間したためである。

各測定日の電導度分布に明らかな違いは認められないことから、湿原内の電導度分布は図7のパターンに落ち着いており、季節的な変化は少ないと評価できる。

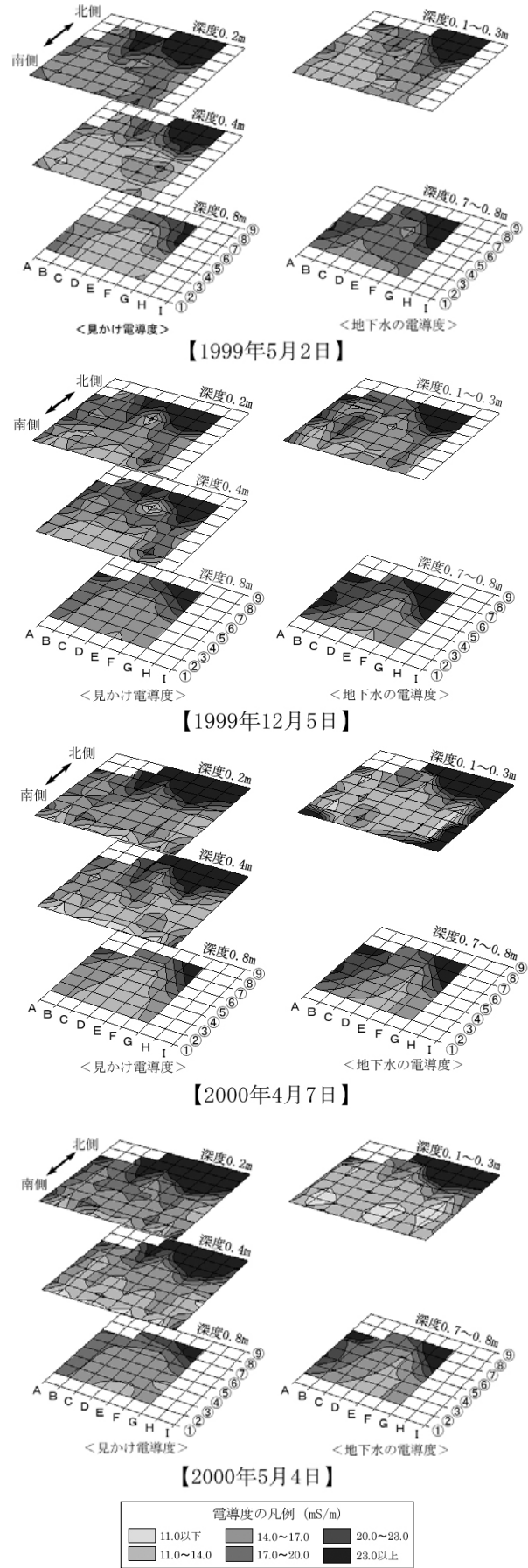


図7 見かけ電導度と地下水の電導度分布図

5.2 見かけ電導度と地下水の電導度の関係

Wenner 法で求めた地盤の見かけ電導度と地下水の電導度の関係を図 8 に示した。図中に示した太線は最小二乗法で求めた近似直線、細線は $y=x$ の直線である。なお、太点線は地盤の見かけ電導度を温度補正しなかった場合の近似直線である。

温度補正した場合としない場合の近似直線を比較すると、補正した場合の近似曲線の傾きのほうが緩い結果となった。これは、湿原の地下水温が 25 より低いため、Wenner 法の見かけ電導度が温度補正機能を有するポータブル電導度計の値より低く測定されたことに起因すると考える。温度補正した場合の近似曲線の傾きは 1 に近づき、両者の差が小さくなるのがわかった。最近では、小型で安価な温度センサが市販されているので、Wenner 法を湿原調査へ適用する際には、測定深度付近の地温を同時に測定し、見かけ電導度の補正を行う必要がある。この作業によって、温度条件の違いに由来する影響をある程度とり除くことができるのがわかった。

Wenner 法で求めた地盤の見かけ電導度と地下水の電導度の間には、太線で示した一次式の関係が成立していた。相関係数は全て 0.8 以上であった。両者には式(5)に示すような比例関係が成立していることから、Wenner 法を用いて湿原内における地下水の電導度を推定することが可能と考える。

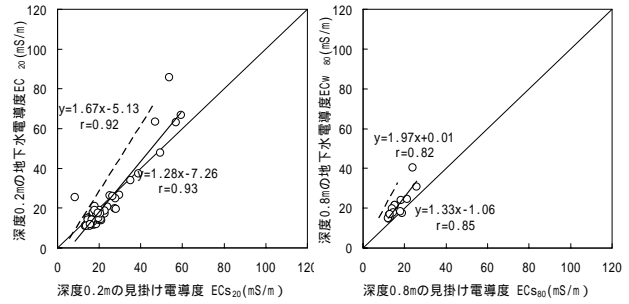
キウシツ湿原の場合、地下水の電導度推定式は、以下に示す(7)式と(8)式で表される。

$$EC_{w20} = 1.00EC_{S20} - 1.15 \quad (7)$$

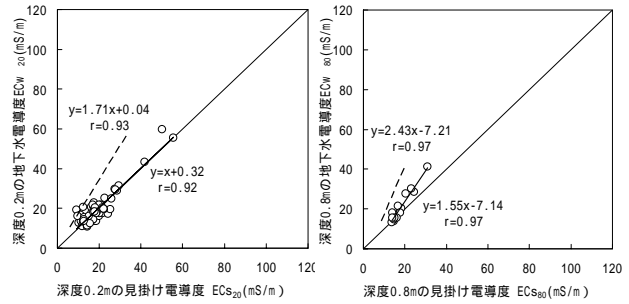
$$EC_{w80} = 1.38EC_{S80} - 2.23 \quad (8)$$

ここに、 EC_{w20} は深度 0.2m における地下水の電導度(mS/m)、 EC_{S20} は Wenner 法によって測定した深度 0.2m の見かけ電導度(mS/m)、 EC_{w80} は深度 0.8m における地下水の電導度(mS/m)、 EC_{S80} は Wenner 法によって測定した深度 0.8m の見かけ電導度(mS/m)である。

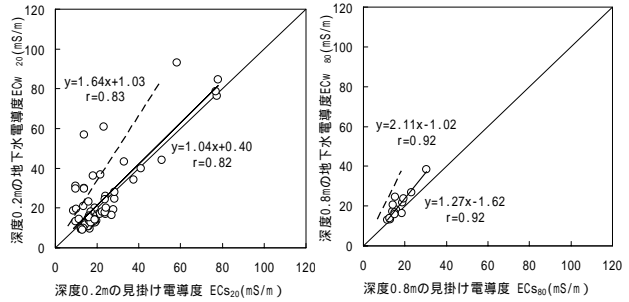
今回行った適用実験結果から、Wenner 法を用いて湿原に分布する地下水の電導度を精度良く調査できることがわかった。キウシツ湿原の地盤は泥炭によって構成されており⁽¹³⁾、地下水位は常に地表付近に位置している。泥炭の間隙比 e は一般的に 5~19、含水比は 115~1150% の範囲にあり、普通地盤と比較して極めて高い値を示す⁽¹⁴⁾。このような湿原特有の地盤条件は、電気探査を適用する



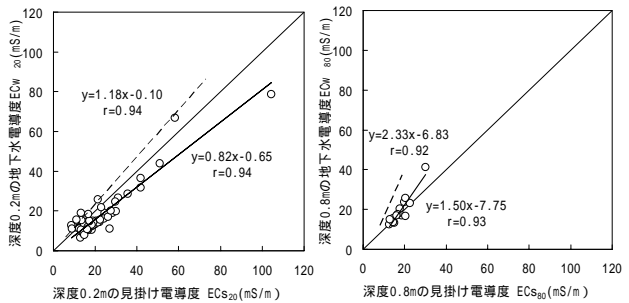
【1999年5月2日】



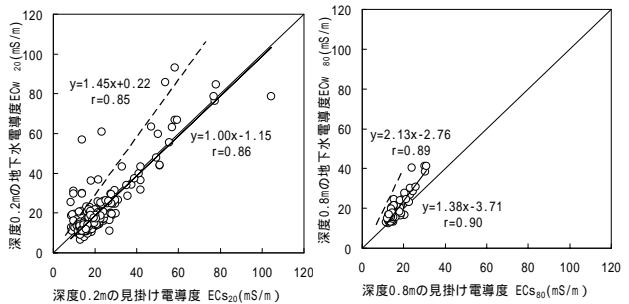
【1999年12月5日】



【2000年4月7日】



【2000年5月4日】



【全測定データ】

図 8 地盤の見かけ電導度と地下水の電導度の関係

上で有利であり、両者の測定値が良く対応することの一因になっていると考える。

5.3 電導度と水質の関係について

キウシツ湿原の電導度分布状況から、イオンを多く含む水が湿原の北側から流入し、Gラインに沿って流出していると予想された。そこで、地下水の電導度が実際の水質をどの程度反映しているかを検証するため、Aタイプ観測孔から採水した地下水サンプルの水質分析結果を用いて、電導度とイオン濃度の関係について考察した。

地下水サンプルの電導度分布図と主要イオン（濃度1mg/l以上）の濃度分布図を図9に示した。図中には採水を行った1999年7月10日の地下水位等高線図もあわせて示した。各イオン濃度と電導度の関係は表1に示すとおりである。

キウシツ湿原の地下水面は湧水点であるC付近から南東方向へかけて緩やかに傾斜していた。この地下水流と調和的な濃度分布を示すのはナトリウムイオンと硫酸イオンであった。これらのイオンを含む湧水は、調査範囲の西側を南方向へ流動していると推測される。電導度とイオン濃度の相関係数は、ナトリウムイオンで0.74、硫酸イオンで0.18であった。硫酸イオンの相関が悪いのは、濃度が低く電導度への寄与率が低いことによるものとする。

マグネシウムイオンとカルシウムイオンの濃度分布は、電導度の分布に良く一致していた。このことは、湿原北側から流入している水にマグネシウムイオンとカルシウムイオンが多量に含まれていることを示している。電導度とイオン濃度の相関係数は、マグネシウムイオンで0.98、カルシウムイオンで0.89であり、電導度はこれらのイオン濃度に大きく影響されていることがわかった。

塩化物イオンは最も濃度が高く、電導度との相関係数は0.58であった。濃度分布の特徴として、FからGへかけて高濃度域が形成されていることが挙げられる。この傾向はマグネシウムイオ

ンにも共通して認められた。湿原北側から流入した水はFからGへ移動して、調査範囲南側の排水路へ流出していると推測された。

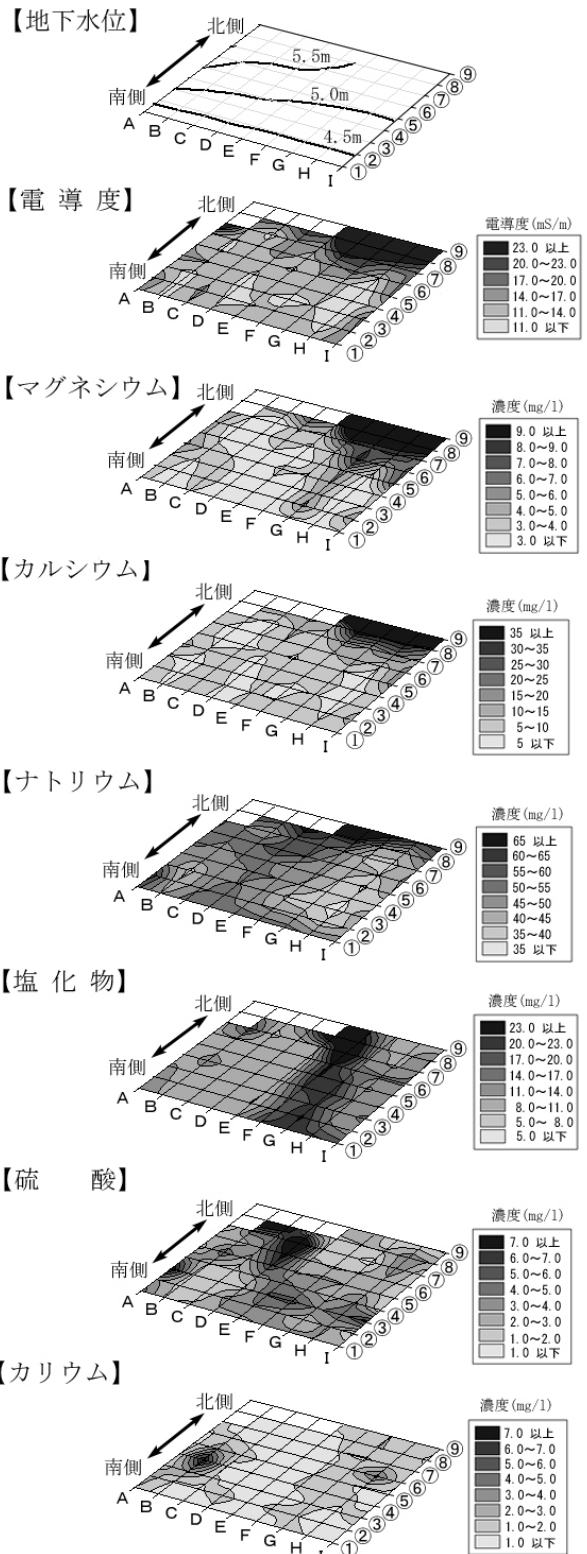


図9 地下水サンプルの電導度分布図と主要イオンの濃度分布図

表1 各イオン濃度と電導度の関係

化学成分	記号	相関式	相関係数r
マグネシウムイオン	Mg ²⁺	y = 0.40x - 1.79	0.98
カルシウムイオン	Ca ²⁺	y = 1.05x - 6.10	0.89
ナトリウムイオン	Na ⁺	y = 0.51x + 40.30	0.74
塩化物イオン	Cl ⁻	y = 0.49x + 5.82	0.58
硫酸イオン	SO ₄ ²⁻	y = -0.02x + 3.64	0.18
カリウムイオン	K ⁺	y = 0.01x + 1.05	0.08

y: イオン濃度 x: 電導度

カリウムイオンに関しては、イオン濃度の分布に特徴を見出せなかった。電導度との相関係数も0.08と極めて低かった。相関が悪いのは、硫酸イオンと同様に濃度が低く電導度への寄与率が低いことによるものと考えられる。

電導度とイオン濃度の分布を比較・検討した結果、電導度分布図から予想したとおり、湿原北側から高濃度のイオンを含む水が流入していることが確認された。電導度は水に溶存するイオン総量を反映した物理量であるが、キウシツ湿原においては、特にマグネシウムとカルシウムの濃度が大きく関係していることがわかった。また、これらの物質の流入が湿原の水質環境に変化を与えていることが明らかになった。

以上の考察から、湿原用測定機器によって得られた電導度は、地下水のイオン濃度を反映していることがわかった。本手法を初期調査に導入すれば、湿原内における水質の違いや変化を概略的に把握することができ、その後の調査方針を決定するのに役立つものと考えられる。

6 まとめ

本研究では、湿原の電導度を異なる深度で測定するために開発した携帯型電導度測定機器を実際の湿原へ適用し、それを用いた新しい水質環境調査法の有効性に関して考察した。

その結果、筆者らが開発した測定機器を用いて足元の悪い湿原の調査を効率良く行えることがわかった。また、湿原の見かけ電導度と地下水の電導度の間には Archie の関係が成立しており、Wenner 法によって地下水の電導度、すなわち湿原の水質を概略的に把握できることがわかった。電導度を高くするような汚染物質が湿原に流入している条件下においては、電気探査比抵抗法による汚染範囲の把握および水質変化のモニタリングが可能であることが示された。実験地である登別市キウシツ湿原の場合、マグネシウムとカルシウムが地下水の電導度に大きく関係しており、これらの物質の流入が湿原の水質環境に変化を与えていることが確認された。今後は、さらに広大な湿原への適用実験を行い、電気探査を応用した湿原環境調査法の確立を目指したい。

謝辞

現場測定を行うにあたり、株式会社ズコーシャ地質調査室の藤崎浩孝氏に御協力を頂いた。記して感謝の意を表す。

また、査読者の方々には、本稿を改善する上で有益な御指摘を頂いた。ここに、厚く感謝の意を表す。

文献

- (1) 矢部和夫, 中村隆俊, 河内邦夫, 高橋興世, 排水路と国道がミズゴケ湿原に与えた影響, ランドスケープ研究, 62, 1, (1999), p557-560.
- (2) K. Yabe, T. Nakamura, Base mineral inflow in a remnant cool-temperate mire ecosystem, Ecological Research, 17, (2002), p601-613.
- (3) 山形与志樹, 小熊宏之, 富士田裕子, 多時期のランドサット TM 画像を用いた湿原植生分類, 写真測量とリモートセンシング, Vol.35, No.4, (1996), p9-17.
- (4) 山形与志樹, 安岡善文, 岩熊敏夫, casi 画像と微細標高データの重ね合わせ解析による湿原モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.16, No.4, (1996), p33-40.
- (5) 高橋宣之, 河内邦夫, 後藤典俊, 矢部和夫, 携帯型電探器を用いた湿原の電気伝導度分布調査～新しい湿原環境調査法へのアプローチ～, 物理探査学会第 102 回学術講演会論文集, (2000)p84-288.
- (6) 高橋宣之, 河内邦夫, 後藤典俊, 矢部和夫, 中村隆俊, 携帯型電探器を用いた湿原の電気伝導度分布調査(2), 物理探査学会第 103 回学術講演会論文集, (2000), p81-85.
- (7) 物理探査学会, 物理探査ハンドブック手法編, (1998), p251-257.
- (8) 島 裕雅, 梶間和彦, 神谷秀樹, 建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法, 古今書院, (1995), p105-107.
- (9) Archie, G.E., The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, Trans. A.I.M.E., 146, (1942), p54-62.
- (10) 朴 三奎, 朴 美京, 松井 保, 地下水と飽和土における比抵抗の温度依存性, 物理探査, 52, 3, (1999), p247-253.

- (11)河内邦夫，高橋宣之，後藤典俊，湿原に用いる電気伝導度測定機器の開発(1)，物理探査学会第100回学術講演会論文集，(1999)，p338-341．
- (12)尾崎 保，登別キウシト。湿原 植物調査記録報告書，ふるさと自然情報局，(1998)，p19．
- (13)登別市，平成8年度 若山地区土地区画整理事業関連地質調査報告書 ボーリング柱状図，(1996)．
- (14)北海道開発土木研究所，泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル，(2002)，p1-5．