

学 位 論 文 題 名

Studies on detection of permafrost structure

(永久凍土の構造の検出に関する研究)

学位論文内容の要旨

地球上に広く分布している永久凍土と気候変動との関係を明らかにしていく上で、永久凍土の分布、構造および状態を把握することは重要である。間接的に地下構造を求める方法として物理探査法がある。このうち、地下の比抵抗値の変化によって地下の構造を推定電気探査法、特に直流電気探査法と時間領域電磁探査法（TEM法）が広く使われている。本論文では、この2つの探査法による永久凍土探査の有効性の検証を目的として室内実験と野外観測を行った。

室内実験は凍土の比抵抗の特性を明らかにするために行った。藤の森粘土では凍土中の不凍水の存在により 0°C近傍において比抵抗値は温度の変化に伴い緩やかに変化することが示された。また野外観測を行った地点から得られた細粒土でも同様の傾向が見られた。低含水率の土では凍土と未凍土の比抵抗の差は極めて小さくなる。この藤の森粘土の比抵抗の変化に対する直流電気探査の有効性を検証するために行ったモデル計算より、凍土と未凍土の比抵抗の変化が小さいために直流電気探査法では境界の検出が困難であることが示された。これに対して豊浦標準砂では、0°C近傍においても凍土中に不凍水はほとんど存在しないために凍土と未凍土の比抵抗値の差は大きくなる。また測定された比抵抗を用いて比抵抗モデルを構築し、凍土の比抵抗を温度の関数として表した。このモデルより、凍土の比抵抗は不凍水の含有量および比抵抗値に大きく影響を受けることが定量的に示された。

野外観測は永久凍土の下面および地下構造の検出を目的として、連続永久凍土帯、不連続永久凍土帯および季節凍土帯で行った。連続永久凍土帯では、ネレゲル（シベリア）での探査より TEM法によって 400m 深付近に比抵抗の不連続面があることが検出された。この深さは調査地付近の永久凍土の下面の深さと一致しており、TEM法によって検出が可能であることが示された。また 60-200m 深に低比抵抗帯が存在し、これは部分融解層を表していると考えられ、TEM法による検出が可能であった。ハトガル（モンゴル）では、TEM法によって得られた高比抵抗と低比抵抗の境界は、地中温度から推定される永久凍土下面とは一致しない。この境界は表面堆積物から基盤への変化によるものと考えられる。基盤中には水がほとんど存在せず凍土と未凍土の比抵抗の差が小さいために、電気探査法で凍結した基盤を検出することは困難である。不連続永久凍土帯では、ナライハ（モンゴル）において TEM法によって得られた永久凍土の下面は、凍土と未凍土の比抵抗の差が小さいにもかかわらず地中温度とよい一致を見せている。またピンゴでの探査結果は、水平方向の比抵抗の変化を正確に表している。カリブーポーカークリーク（アラスカ）では直流法と TEM法を同地点で行い比較している。ここでは地表面付近に存在する高比抵抗帯（基盤）の TEM法への影響を軽減させるため、受信センサーと送信ループの距離を取るアウトループ測定を行うことにより、良質のデータを得ている。TEM法による探査結果は直流法に比べて地中

温度とよい一致を見せていることが確認され、これはモデル計算によっても確かめられた。探査地の土は細粒土であり、室内実験より凍土と未凍土の比抵抗の差は小さいことが分かり、このために直流電気探査法では凍土の下面を正確に表すことができないと考えられる。TEM法では、凍土と未凍土の比抵抗の差が小さい地域や基盤の浅い地域においても有効であることが観測より明らかになった。

比抵抗を用いて凍土を表すために、凍土と未凍土の比抵抗の比を用いる方法をここでは提案している。この比抵抗の比は、層構造解析で得られた凍土の比抵抗の未凍土の比抵抗に対する割合で与える。比抵抗の比は連続永久凍土帯では 4.5 以上、不連続永久凍土帯では 1.2 以上、季節凍土帯では 1.5 以上となっている。不連続帯で得られる低い値は土が乾燥しているためである。乾燥している土は凍土と未凍土の比抵抗の差が小さいために、比抵抗の比は小さくなることは室内実験より確認されている。凍土の比抵抗の比は、含水率が高い場合は下限が 1.5 であると考えられる。室内実験の結果では、 0°C と -1°C の比抵抗の比は 1.6 以上となり、比抵抗の比が 1.5 以上というのは凍土と未凍土の差を表していることが言える。またピンゴ氷のような集塊氷では、比抵抗の比は 35 以上となることが観測結果からわかった。

この凍土と未凍土の比抵抗の比を考慮する方法を用いることにより、永久凍土の分布および構造の探査において、より効率的に研究が進められると期待される。

学位論文審査の要旨

主査	教授	福田正己
副査	教授	前野紀一
副査	教授	平川一臣
副査	教授	大畑哲夫
副査	助教授	知北和久 (大学院理学研究科)

学位論文題名

Studies on detection of permafrost structure

(永久凍土の構造の検出に関する研究)

地球陸地の約15%を占める永久凍土は、北極を中心に広く分布している。数万年前の寒冷期(氷期)には、現在よりも水平的・垂直的分布が拡大したが、一万数千年以降の後氷期の地球温暖化のために、熱的な不安定状態が進行している。永久凍土には、過去の環境下で生成された温暖化効果ガスが個体状態(ハイドレイト)で貯留されており、温暖化によって永久凍土の融解が進行することで、こうしたハイドレイトが分離して大量の温暖化効果ガスを大気へ放出する危険性が指摘されている。そこで永久凍土の下限位置の変動や、内部構造をモニタリングすることは、将来の温暖化予測に関わる重要な研究課題である。しかし、従来の方法(ボーリング探査)では、取得情報は浅層部分に限られたり、あるいは水平分布を掌握することが困難であった。そこで本研究では、新たな手法を開発し、電磁気探査を応用することで、的確に永久凍土の下限位置の決定と内部構造の推定を可能とすることを主な目的とした。

地盤や土壌は、常温から凍結へ変化することで、その電気的性質特に比抵抗が大きく変化する。この性質を利用して、凍土と未凍土の境界面や凍土内の構造を検知するのが、電磁気探査法である。本研究では、まず低温実験室において、粒度組成や鉱物組成の異なる様々な土試料を用いて、 -20°C から $+20^{\circ}\text{C}$ までの温度変化に応じた直流電気比抵抗値の変化を測定した。ここで用いた豊浦標準砂と藤森粘土は、多くの土試料の両極端に位置しており、実験によって得られた結果は、実際の現場条件をほぼ網羅している。実験の結果から、凍土に存在する未凍結状態の水(不凍水)が温度とともに量変化することに由来して、比抵抗値が変化し、それを定量的に示す経験式を提案した。この実験結果は、後に野外での電磁気探査による構造決定法に用いられ、特に凍土下限の位置決定に適用された。

永久凍土の分布特性から、連続的な分布地域と部分的に凍土が途切れる不連続的な分布域に大別する。各々の地域での凍土分布とその地下構造を調査する方法として、本研究では従来用いられてきた比抵抗探査法と新たに導入した電磁気時間領域探査法(TEM法)を比較適用し、後者による方法が凍土の構造検知に有効であることを示した。

上記の検証のために、連続的永久凍土地域として、東シベリアとモンゴル北部を調査対象域とした。また不連続的な凍土地域としては、フラスカ各地、スピツバルゲン、モンゴル中央部の現地調査を実施した。

従来の比抵抗探査法では、設置する電極と大地との接触抵抗や、高比抵抗層が上部に存在する場合などは、検流する電流が大地に浸透せず、十分な地下構造データが得られない。フラスカ・トラ一地域では、上層凍土が砂質土からなり、わずかに含まれる塩分の存在によって、大地電流が比較的大きく、地下構造の決定が可能となった。これ以外の地域では、決定が困難であったりあるいは実測と大きく食い違う結果を示した。一方、時間領域電磁気探査法では、地表に設置したループ状のコイルに電流を一瞬流し、遮断の後に励起された電磁場を維持するように流れる大地電流を、地上の別コイルで検知する方法である。このため、電極の接地抵抗や上部層の高比抵抗層の影響を受けることなく、凍土の構造を検知することが可能となる。

シベリア(ヤクーツク)の永久凍土の厚さは400-500mであることが、ボーリング探査から知られており、この地域で200m×200mの大型地表ループコイルを用いた探査を実施した。その結果、地表から410mに明瞭な比抵抗の異なる層があることが判明し、ボーリング探査との対比から、ここが永久凍土の下限であると決定した。

考察において、従来の比抵抗を用いた凍土と未凍土境界の判定が、その比抵抗値のみによることの限界をまず示唆した。実験結果から、土質により凍土に含まれる不凍水量が異なり、それが比抵抗値を決定することから、比抵抗値のみでは、土質の差を表現しきれず、従って凍土構造を推定出来ない。それに対して、今回の研究では、土質に依らずに凍土と未凍土の比抵抗の比が1.5以上あればいくつかの例外を除いて、凍土/未凍土の境界と抗の比が1.5以上あることを示し、下部構造の情報なしに時間領域電磁探査することが可能であることを明らかにした。ここで法の結果のみで、その位置決定が可能であることを明らかにした。ここで例外的に適用できない場合は、基盤岩石から構成され、またその含水率の低い場合と、2つの異なる地層境界とこの比抵抗値の異なる境界面とが一致する場合である。TEM法の垂直構造の検出分解能は、その位置深さの5%程度であることから、もしTEM法に凍土/未凍土の境界面位置の前後5%に、異なる地層境界面が存在する場合には、TEM法による凍土下限決定の適用外となる。この二例のうち、前者については、モンゴル北部での探査から、その事例を示した。

以上従来、困難とされていた、永久凍土の内部構造、特に下限位置の定を、新たに適用法と解析法を開発したTEM法を永久凍土分布する各地で実測し、凍土/未凍土の境界がその前後の抵抗値比1.5以上であること

を初めて明らかにした。・これにより将来永久凍土の熱的不安定状態を、広域的に探査することを可能とした点で大いに研究進展に寄与し、新たな知見と解析法の提案において、高い評価を得た。審査員一同は、こうした成果と既に海外での専門誌での論文掲載実績を評価に加え、申請者が博士(地球環境科学)の学位を授与されるに十分な資格を有すると判定した。