

GPRによる地下水動的挙動のモニタリング ：トーラ川(モンゴル)流域における実証例

佐藤 源之¹⁾・鹿 瑛^{1), 2)}

1. はじめに

誰もが思い浮かべる緩やかに広がる草原, 疎らな植生と砂地が織りなすゴビなどは, モンゴルが世界に誇る, 美しく貴重な自然資産である。ところが一方では極端な小雨がつくる貴重な北部森林を木材として利用したり, 草原を切り開いて行われる農耕, また現金収入を求めめるために変容する放牧形態, 更に急減なウランバートル市への人口一極集中化など, モンゴルでは人間活動が生態系に与える負荷の増加が非常に大きな問題である。

我々の研究グループはモンゴルの自然を対象に, 持続可能な開発を実現するための方法として, 地中レーダ(GPR)による環境評価の現地実験を主体とする研究を1999年より継続して行ってきた。

首都ウランバートルにモンゴルの山地から雪解け水をもたらすトーラ川は国境を越えバイカル湖に流れ込む。我々はトーラ川流域で長期にわたる地下水変動の状況を調べると共に, 地下水資源量予測を目的とした地中レーダによる地下水の動的挙動計測を試みてきたが, 2001年夏に行った実験において, 明確な地下水の移動を捉えることに成功した。GPRの地下水, 地下環境計測への応用範囲は広いが, 地下水の動的挙動測定は地下水資源の有効な利用へつながるものと期待する。本稿ではモンゴルにおけるGPR実験の概要をのべ, 環境計測への応用を展望する。

2. 地下土壌水分のGPR計測

GPRは電波の物質からの反射を捉えて地下のイメージングを行う(佐藤, 2006)。埋設管などの金属製人工物を除けば, 地下での電波の反射は, 物質の

誘電率の違いに起因する。最も簡単なモデルとして上層と下層で比誘電率の異なる2層媒質構造を考える。上層から入射する振幅1の電波は境界面で反射を受け, 振幅 Γ の反射波が発生する。 Γ は反射係数であり, 水平な2層構造の境界面では次式が与えられる。

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (1)$$

(1)式は2層の異なる媒質の比誘電率 ϵ_1 , ϵ_2 の比率が反射波の大きさを決めることを示している。

土壌, 岩石など地球構成物質は乾燥状態では似たような比誘電率(5-10)であるのに対し, 湿潤状態では値が大きく変化する(10-25)。つまり, 土壌や岩石などで構成される地層の比誘電率を決めるのは, 地層構成物質の差異より地層に含まれる水分率が主要因である。土壌の体積水分率 θ と比誘電率 ϵ_r の関係を表現するために次に示すToppの実験式が利用されている(Topp *et al.*, 1980)。

$$\theta = -0.0503 + 0.0292\epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4}\epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6}\epsilon_r^3 \quad (2)$$

これと(1)式から, 土壌水分率の変化により電波が反射することがわかる。

3. モンゴルの地下水とその利用

小雨地域であるモンゴルでは, 地表面付近の土壌が極端に乾燥しており, 地下水面とその上面の地層での誘電率のコントラストが大きく, 従って電波の反射率が高く, GPRプロファイルに明瞭な反射が現れる。また含水率が低い土壌は電波の減衰率も低く, 10m程度の深度の地下水面もGPRで比較容易に捉えるこ

1) 東北大学 東北アジア研究センター

2) 吉林大学

キーワード: 地中レーダ, GPR, 地下水, 動的挙動, モンゴル, トーラ川

とができる。こうした物理的性質から、モンゴルの環境計測にはGPRが非常に適していると考えている。

更に広大な地勢を利用し、日本国内では実現できないような実験に挑戦できるのもモンゴルでの現地実験の魅力である。我々は低周波アンテナを利用したGPR計測や衛星計測との同期実験なども試みている。

モンゴルの降雨量は我が国に比べ極端に少なく、ウランバートルの年間平均降水量は250mmである。また降雨は7月、8月に集中している。ウランバートルの上水道の主たる水源は地下水の汲み上げによっている。地下水源は、ウランバートル市南側を北東から南西に流れるトウラ川の周辺に発達している帯水層へ、山岳部から川に沿って流入する水に起因すると考えられる。年間を通じた降雨量の季節変動は、地下水状態にも季節変動を引き起こしており、ウランバートル市内では地下水の深度変化による地下室への水の流入などの問題も発生させている。

一方、ウランバートルでは1970年代30万人程度だった人口が民主化後の急激な人口増加により2007年春には100万人を超えた。人口増加による上水道の需要増加により水源確保に近い将来問題になることが予想されており、上水道施設の整備、漏水防止、上水道水源確保などの対策がとられてきた。特にウランバートル市内において、国際協力事業団（JICA）の援助による上水道整備が大規模に実施されている（JICA, 1995）。

ウランバートル市の上水道はウランバートル市水道局（USAG）が管理・運営している。USAGはウランバートル市内に4カ所の水源地帯を持ち、100本以上の井戸から揚水して消費者へ給水している。JICAのプロジェクトによればウランバートル市内の上水道供給について、当面の間、現在行っている地下水揚水で需要は賄えるとしているが、地下水地域の効率的な水資源利用の必要性が同時に指摘されている。

USAGは数km四方に及ぶ広大な水源地に等間隔に井戸を配置して揚水を行っている。同一性能をもつ揚水ポンプで同程度の深さの井戸から揚水しているにもかかわらず、隣接した井戸の間でも揚水量に大きな差のあるのが現状である。ちなみに井戸の間隔は約200mである。このことは、帯水層の分布が水平かつ均質ではないことが予想され、同一地域で同じような条件に見える揚水井戸も、井戸ごとに異なる

性質を持っていることが予想される。従って、現在生産量の少ない井戸については水脈に当たるよう位置をずらすなどして、現在の井戸の本数や水源地域の面積を増やさずに、生産量のみ増産できる可能性がある。将来的な水資源の確保のためには新たな水源地の確保も必要ではあるが、現状の水源地の有効利用は水道配給施設の新設を必要とせず、経済的にも優れた方法である。

通常地下水の生産能力は揚水量によって評価されるが、井戸周辺に広がる帯水層から生産可能な揚水量は揚水を行うポンプの能力だけでなく、帯水層に供給される地下水量、帯水層内の透水率などの地下水理的な要因によって強く規制される。揚水量による生産量評価では帯水層内部での地下水状態を知ることができないため、評価能力に限界がある。

4. GPR計測実験

GPRは地表面から地中内部の様子を可視化することができる地下計測技術であり、地下水の検知に有効な手段であることが知られている。これまで、地下水面の深度や地層の計測などにGPRは利用されてきている。我々のグループは1999年以来、毎年USAGが管理するウランバートル市南部に隣接したCentral Water Source地域の水源地において地下水面の地中レーダによる計測実験を行ってきた。一連の実験によって、当該地域の地下約5m程度にある地下水面を地中レーダによって明確に捉えられることがわかっている。

現地でGPR計測を行っている様子を口絵p.8-第1図に示す。揚水を行っている地域は一般人の立ち入りが規制され、地表には構造物などがない草地である。GPR計測を行う上では、自由な方向に100m以上の直線状測線も容易に設定できる。レンガ造りのポンプ小屋は1960年代に旧ソビエト技術者が井戸を掘削したときに建造したものであるが、内部にはJICA支援によって日本製のポンプが設置され、すべてのポンプの状態は集中管理されている。

帯水層内の地下水は井戸からの揚水などが無い状態では、口絵p.8-第2図（左）に示すように地層構造中ではほぼ水平な地下水面を形成すると考えられる。この帯水層からポンプにより揚水を行うと帯水層内で地下水流動が発生する。地下水流動は流動抵抗を

伴い井戸に近い帯水層からはより多くの揚水が行われるため、口絵p.8-第2図(右)のように地下水面が周囲に比べて低下することが予想される。ただしこれは井戸周辺の帯水層を構成する地層の透水性が均質と仮定した場合である。地下水状態を揚水量の変化によって制御し、異なる状態でGPR計測を行えば、地下水面の動的な挙動を理解することで、従来の揚水量と井戸の地下水位のみの評価方法に比べ遙かに多くの情報を取得できることが期待できる。

こうした予想のもと、2001年10月4、5日にGPR計測を実施した。実験サイトは1999年から計測を開始したウランバートル市街南側に隣接するCentral Water Source地域のNo.10井戸のポンプ小屋周囲である。既に前年までの実験によって地下水の分布状況は把握できているが、降水量の年間および季節変動により、必ずしも地下水位は毎年同じでないことが確認されている。この位置におけるポンプは通常状態で揚水を行っている。そこで揚水を行っている状態と、揚水を停止し、しばらく時間が経過し静止状態に到達したと思われる時点の2回、GPRによる計測を行うこととした。具体的にはポンプを通常通り稼働している状態で初日にGPR計測を行い、測定終了後、ポンプを停止し揚水を止めた。その後井戸の水位をモニターすることで地下水位が定常状態に達することを確認し、約12時間後、ポンプを停止したままの状態再度GPR計測を行った。井戸の水位は揚水中5.30 m、揚水停止後約12時間経過した時点で4.65 mであった。

同じように揚水を停止する前後のGPR実験は2000年度にも実施したが、いくつかの問題点が明らかとなった。まず、地下水位の変化はGPRプロファイルで明らかに認められるものの、地下水位の変化量が数cm程度と小さいため測定波形を単純に比較しても定量的な変化を推定できない。また、揚水停止前後の2枚のGPR波形を計算機上で信号処理し、2枚の波形の変化量である残差を求めたところ、波形の位置的な重なりが十分でないため、残差に測定誤差が多く含まれることがわかった。これらの解決策として、(1)通常GPRは約10cm移動するごとに一波形を取得するが、これを2cm間隔とし、データ密度を増やす、(2)揚水停止前後でGPRが正確に同じ位置で測定できるように地表面にテープを固定し再現性を高めた、(3)更に5m程度の比較的浅い地層が対象であるため、デ

ータサンプリング周波数を高め、高密度の垂直分解能を実現した。

これにより、地表面での水平方向のアンテナ位置精度誤差は1cm以内になった。

今回使用したGPR装置はスウェーデンMala Geoscience社製RAMAC GPRであり、中心周波数100 MHzのアンテナを利用した。レーダは地表面にピンで固定されたテープの上を2cmごと移動しながらプロファイル計測を行った。また、同時に同一測線上の何点かでCMP計測を行い、垂直水分率分布の推定に利用した。

5. 垂直水分率分布推定

口絵-第3図にCMP計測を利用して行った垂直水分率分布の推定の例を示す。CMP計測は地震探査でよく知られている手法であるが、GPRにおいても、一地点における垂直方向の水分率分布を推定するために有効な方法である。CMP計測はある1点を中心(Common MidPoint)に定め、GPR送受信アンテナを互いに反対方向に移動し同一反射面から異なる送受信位置でレーダ波を計測する。口絵p.8-第3図(a)は生波形である。図中60nsに矢印で示した深度に地下水位面がある。レーダ反射波は地下水位面だけでなく、多くの地層面で発生していることが観察できる。次にデータから速度スペクトラムを計算した結果を口絵p.8-第3図(b)に示す。速度スペクトラムは、レーダ波の反射時刻ごとにその周辺での媒質中の電波伝搬速度を与える(佐藤, 2006; Lu and Sato, 2007)。速度スペクトラムは電波の反射が起こる位置で大きな振幅を持つ。表層は乾燥した砂礫層であるため反射は起こらず、地下水位面である60ns付近で、急に大きくなる。これにより深度が大きくなるに従い緩やかに速度が低下していくことがわかる。電波の伝搬速度 v は物質の比誘電率 ϵ_r と以下の関係にある。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ (m/s)} \quad (3)$$

そこで、速度スペクトラムから伝播速度を求め、(2)のToppの式から水分率に換算できる。口絵p.8-第3図(c)に推定した水分率分布を示す。推定された水位5.53mを図中に示している。

6. 地下水の動的挙動評価

次に、通常のGPRで用いられるプロファイル (Common Offset) 計測の結果を示す。ポンプ小屋から北方向に放射線状に設置した測線N上で測定したGPRプロファイル (波形断面) を口絵p.8-第4図に示す。水平軸はアンテナの測線に沿った位置、垂直軸は地表面から発射した電波が反射する時間を表しており、擬似的に地中の垂直断面図と見ることができる。井戸はレーダプロファイル左端から3mに位置している。口絵p.8-第4図において(a)は揚水を停止した状態、(b)は揚水中の測定波形であり、(a) (b)間で波形の相違が見られる。更に(a) (b)の波形のそれぞれの位置における残差を計算したのが(c)である。また各波形の上面が左に行くにつれやや上に持ち上がっているのは井戸の上にあるポンプ小屋付近で地表面が持ち上がっている地形断面を反映している。

GPR波形では地表面付近からの強い反射波と、送受信アンテナの直接結合により、早い時間には非常に強い信号が現れるが、これは地中からの反射波ではなくアンテナ間直接結合である空中波 (Air wave) である。口絵p.8-第4図 (a) (b) では時刻80ns程度までの波形がこれに相当している。一方、口絵p.8-第4図 (c) では、時刻100ns付近にほぼ水平な反射波が明瞭に現れ、早い時間から80nsあたりに現れていた波形は非常に弱まっている。これは、(a) (b) 2つのGPRプロファイルの差が現れるのが時刻100ns付近、深度に換算して5m程度に位置することを示している。また変化は左側、つまり揚水している井戸の近くで水位が低く、離れるに従い水平に近づいていることを示している。しかしGPRプロファイル右端、井戸から約18m離れた位置でも100ns付近の変化はやや傾いているように見え、揚水による影響はこの付近まで及ぶことが推定できる。

本計測では、揚水量を変化させながら地下水面の深度方向の変化と、水平方向の広がりの変化を検知できた。これらの値を利用して、地下水層の透水係数

などを定量的に推定することができた (Lu and Sato, 2007)。

7. まとめ

2001年10月に実施したフィールド実験の結果、当初の予想通り揚水している井戸の周囲20m程度の地下水の動的挙動をGPRによって測定可能であることを実証した。またGPRによる水分率の垂直分布計測は、開削による水分率変化を伴わず、また任意の位置での計測が可能なることから、有効性の高い手法である。

GPRは地質や地下水の定常的な状態だけでなく時間的に変化する様子も測定可能であることを示すことができた。GPRは乾燥した地層中の地下水状態の把握に有効な計測手法であり、モンゴルにおける今後の活用が大いに期待できるものと考えている。

地下水、環境問題の他、道路や建物の建設、また道路保全管理など、GPRの応用範囲は広い。特に高速な計測が可能であることから広い地域への適用が可能であること、また他の地下計測手法と比較して装置が小型かつ安価なことからモンゴルにおけるGPRの応用を拡大していくことで社会基盤の充実に大きな寄与をするものと考えている。

参考文献

- JICA (1995) : ウランバートル市水供給計画調査 最終報告書, 国際協力事業団.
 佐藤源之 (2006) : アンテナ・無線ハンドブック, V章5.3「地中レーダ」, オーム社.
 Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) : "Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines," *Water Resour. Res.*, 16, 574-588.
 Lu, Q. and Sato, M. (2007) : Estimation of hydraulic property of an unconfined aquifer by GPR, *Sensing and Imaging*, in press.

SATO Motoyuki and LU Qi (2008) : Dynamic Ground Water Monitoring by Ground Penetrating Radar: Case study in Tuul river, Mongolia.

<受付：2007年11月30日>