

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：15101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12455

研究課題名(和文) 地下水の水みちを考慮したモンゴル草原地帯における浅井戸掘削最適地の判定

研究課題名(英文) Determination of optimal points for shallow wells considering the groundwater path in Mongolian grassland

研究代表者

河合 隆行 (Kawai, Takayuki)

鳥取大学・乾燥地研究センター・プロジェクト研究員

研究者番号：20437536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、乾燥・半乾燥地に住む遊牧民が使いやすい「水位があまり深くなく水量の十分な浅井戸」を増やすことを目的に、測定が容易な地下流水音を用いた浅層地下水探査技術の開発を行った。その結果、以下の3点が明らかになった。1. 地下流水音の音圧が検出限界と同程度の場合、その地点には地下水資源は存在しないと判断可能である。2. 半乾燥地においても、地下水が賦存し微少な地下水流動が発生しているならば、地下流水音により高い精度で地下水位を推定可能である。3. 地中に地下水の水みちがある場合、周囲の地下流水音との不連続が生じ、断層等の地質構造が判断できる。

研究成果の概要(英文)：We developed the groundwater exploration technique with the aim of increasing wells with the shallow groundwater level and sufficient water volume for nomadic people in arid and semi-arid region. As a result, the following three points were clarified. 1. If the groundwater aeration sound is about the same as the detection limit, it can be assumed that there is no groundwater resource available for nomadic people at that point. 2. If shallow groundwater is present and minute flow is occurring even in semi-arid areas, the groundwater level can be estimated with high precision by groundwater aeration sound. 3. When there are groundwater paths arise from geological structure, discontinuity with surrounding groundwater aeration sound occurs, so the geological structure such as fault can be explored.

研究分野：地下水水文学

キーワード：浅層地下水 地下流水音 地質探査 モンゴル草原地帯

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) モンゴルの乾燥草原地帯における地下水の重要性

モンゴル国では15665万haの国土の82.5%が牧草地として利用され、国民の30%が遊牧に従事している。その遊牧の際に人間や家畜が利用する水資源の大部分が地下水であるが、近年では多くの遊牧民・家畜がエンジン付きの深井戸に集中し、地下水資源の枯渇が問題となっている。

乾燥・半乾燥地域での深部地下水は涵養能が低いため、一度枯渇すると復活には時間がかかる。そのため、各地に利用しやすい浅井戸、つまり、水の汲み上げに多大な労力を必要としない「水位があまり深くなく水量の十分な浅井戸」を増やすことが、モンゴルの国家目標として挙げられている。

しかし、現時点では、広大な面積かつ自然条件の厳しい乾燥地において、これらの条件を満たす地下水環境を探索する技術は確立されていない。迅速かつ簡便に、利便性の高い浅井戸の掘削地点を決定できる手法が希求されている。

### (2) 地下流水音の特徴と乾燥地における有用性

地下流水音とは、地下水が流動する際に発生する各種音波の総称であり、先行研究では、地下流水音の高い地点に斜面崩壊の原因となる地下水集中地点があることが明らかになっている。

地下流水音の測定方法は、集音センサを地表面に挿入するだけという非常にシンプルなものであり、装置も約500gと軽量であるため、自然条件の厳しい乾燥地の野外での調査に適している。

報告者らは先行の研究において、モンゴル国の複数の地質条件下で、地下流水音を用いて自由地下水面の深度をメートル単位で推定することに成功している。また、同じ地点において測線上で複数の地下流水音を測定した際、地下流水音が異常に大きくなる特異点があることを発見した。これにより、地下流水音を用いることで地下水が選択的に流動しやすい「水みち位置」を特定できることが期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、モンゴル草原地帯で十分な水量を得られる浅井戸をどこに掘削するべきかという問題を解決するため、モンゴル北部の草原地帯・中央部の半乾燥草原地帯・南部の乾燥草原地帯の3か所に観測サイトを設け、

(1) さまざまな地質・地表面状態において地下水位が地表面下10m以内の地点を抽出する手法を確定し、また(2) それらの地点でさらに地下水が集まりやすい「水みち」位置を特定する手法を確立する。

## 3. 研究の方法

### (1) 研究対象地

モンゴルの草原地帯における異なる地質・地表面状態でのデータ取得を行うために、モンゴル南部の乾燥草原地帯(ウムヌゴビ県ブルガン市)・中央部の半乾燥草原地帯(トゥブ県バヤンウンジュール市)・北部の草原地帯(ブルガン県モゴド市)の3か所に観測サイトを設けた(図1)。



図1 モンゴル国内の観測地点

① 南部の乾燥草原地帯であるウムヌゴビ県ブルガン市は砂漠気候に属し、年平均降水量は100-125mmである。植生が乏しく裸地が卓越し、灌木や草本類がまだらに分布している。また、移動性の砂丘が点在しており、この砂丘内には*Haloxyylon ammodendron*(サクソールあるいはザグ)が粗密に生育している(図2)。

水資源は乏しく、湖や恒常河川は存在しない。住民や家畜は地下水(井戸と湧水が数点存在している)を利用している。



図2 ブルガン市内の観測地点

② モンゴル中央部の半乾燥草原地帯であるトゥブ県バヤンウンジュール市はステップ気候に属し、年平均降水量は200-225mmである。植生は*Caragana*(カラガナ)属の灌木と草本類が混在しており、被覆度は高くない(図3)。また、山地付近には*Ulmus*(ニレ)等の背丈のある木本類が数本単位で分布している。

バヤンウンジュール市内に規模の大きい恒常河川は存在しないが、低地には塩湖が複数存在し、それらの湖沼を結ぶように小河川が存在している、ただし、小河川は降雨直後以外では断流状態である。また、湧水が数点存在しているが湧出量は乏しい。市内には多数

の浅井戸が存在し、住民や家畜の大半は地下水を利用している。



図3 バヤンウンジュール市内の観測地点

③ 北部の草原地帯であるブルガン県モゴド市は亜寒帯気候に属し、年平均降水量は325-350mmである。標高の高い地点には季節凍土が分布し、その分布と一致するように *Betula* (カバ) 等の木本類が生育している。また、草本類の種数も多く(湿潤地で20種類程度、半乾燥地で5種類程度)、地表面被覆度は高い(図4)。



図4 モゴド市内の観測地点

水資源は豊富であり、モンゴル国内で上位の資源量を有する。市の西部と北部をオルホン河(モンゴル国内最大の流路長であり、セレンゲ河と合流後、バイカル湖、エニセイ川、北極海へと流下する大河)が流れている。また、市内には数百の湧水が点在し、小河川、湖沼も多い。対して井戸は少なく、住民や家畜は湧水地や河川の地表水を利用している。

## (2) 観測方法

各サイトでの観測は、既存の観測井や湧水がある地点に測線を設け、地下流水音探査と既存の地下水探査技術を併用して地下水深・水みち位置の推定精度の確認を行った。

### ① 地下流水音探査法

地下流水音とは、地中水の飽和帯と不飽和帯の境界面で発生する曝気音のことである。曝気音は、飽和帯の地下水が流動することによって飽和-不飽和境界付近の間隙空気が移動し、その結果、土壌粒子間の水膜がはじける際に発生する。測定には地下流水音測定装置(図5, GAS-03・拓和)を用い、3~10m間隔での測定を実施した。得られた音圧デー



図5 地下流水音測定装置

タ(無次元単位)から、先行結果の推定式を用いて地下水位を推定した(図6)。

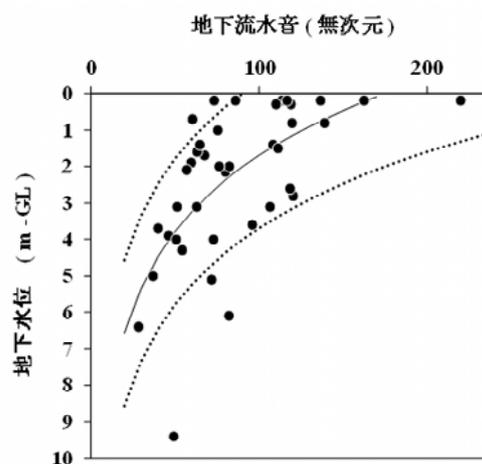


図6 地下流水音-地下水位の相関

### ② 2次元比抵抗映像法

ダイポール-ダイポール法による比抵抗構造の探査・解析を実施した。電極間隔は3~10mとし、深度0~20m、あるいは0~150mまでの比抵抗解析を行った。測定にはSYSCAL\_KID, SYSCAL\_PRO(図7, IRIS)を使用し、地下流水音と同じ測線にて探査を行った。得られた比抵抗映像構造から地質構造を推定した。



図7 SYSCAL\_PRO()

### ③ 地中レーダー法 (GPR)

100MHz と 500MHz のアンテナを使用し (図8) Common-offset 測定を実施した。測線は地下流水音・2次元比抵抗映像法と同じである。100MHz の反射波を用いて地質構造の推定を、500MHz の反射波を用いて地下水面の位置の推定を行った。

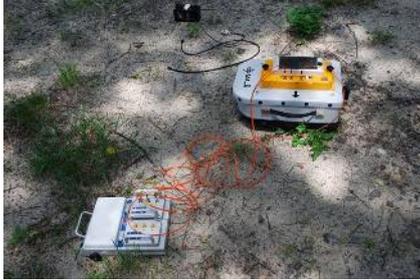


図8 GPR\_500MHz

### ④ 現地踏査

レーザー距離計・角度計・巻き尺を用いて地形面測量を行うと同時に、岩石サンプリングによる地質同定を実施した。植生調査も実施し、各測点における種数調査を実施した。土壌水分計や重量法による地表面の水分状態も測定した。

## 4. 研究成果

(1) 南部の乾燥草原地帯であるブルガン市では砂丘内で観測を行った。市内の砂丘地以外では表層土がほぼ無く、降水もすぐに蒸発してしまう。一方、砂丘は降水を下方に浸透させ、わずかながら地下水として貯留すると考えられている。実際に、砂丘内には木本 (*Haloxylon ammodendron*) と少数の草本が生育し、砂丘周辺には井戸も存在する。

砂丘内部、砂丘外縁の堆積岩帯で2次元比抵抗探査を行ったところ、明確な地下水面は確認されなかった。また、地表面土壌の含水比は0.6~1.3%であり、極乾状態であった。

地下流水音の音圧は全地点で5.5~6.75であり、これはバックグラウンド値とほぼ同じである。この結果から、1. 地下流水音測定装置で集音出来ないほど深くに地下水がある、2. 地下水が全くない、3. 集音可能深度内に地下水があるものの全く動いていない、の可能性が考えられるが、2次元比抵抗映像法の結果とあわせると「浅層域には地下水が全くない」ことが考えられる。

このことより、地下流水音の音圧が7以下、つまりバックグラウンド値とほぼ同程度の場合、その地点には遊牧生活に必要な地下水資源は存在しないと、判断できることが明らかになった。

一方、堆積岩帯で断層崖が発達している地点には湧水が存在していたが、その湧出ポイント付近では、地下流水音の音圧は300以上であった。この湧水は、断層に沿って山地か

ら平野部に流動している地下水の水みち末端と考えられ、断層等による大規模な地下水流動は地下流水音探査で容易に検出できることも明らかになった。

(2) モンゴル中央部の半乾燥草原地帯であるバヤンウンジュール市では、山地から平野部までを含み、かつ遊牧民が使用している井戸を含む測線を設けた。図9に結果の一例を示す。図9の下図は地下流水音の測定結果を、上図は地表面形状と図6の近似式による推定地下水位を示している。なお、山地内には小規模な断層が3本存在していることが比抵抗探査で明らかになった。

水平距離100~500mの平野部では地下流水音は大きく変化せず、推定水位は4~6mであった。水平距離500m以降の山地に入ると、地下流水音は平野部よりも大きくなり、推定水位はプラス0.5~4mであった。平野部から山地にかけて推定地下水位が浅くなっており、一般的な自然状態を再現していると考えられる。

また、上図の青矢印地点は井戸近辺になり、観測時の井戸内水位は地表面より-5.4mであった。この地点の地下流水音による推定水位は6.0mである。この結果から、多量の降水がない半乾燥地においても、地下水が賦存し微少な地下水流動が発生しているならば、地下流水音により高い精度で地下水位を推定できていることが検証された。

さらに、山地部で推定水位がプラス0.5~0mになる地点が3か所あるが(上図の赤矢印)、この地点は断層の直上にあたる。断層による特異な地下水移動のために地下流水音が大きくなり、実際の地下水位よりも浅く推定されたと考えるのが妥当である。この結果から、地下流水音は断層構造に起因する地下水の水みちを検出できることが明らかになった。また、地下流水音測定法で地下水位を推定する

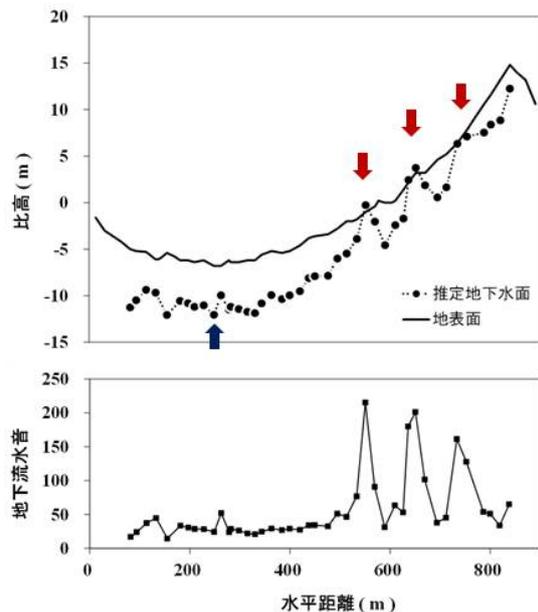


図9 半乾燥地底の斜面における地下流水音

際には周囲数点において音の測定を行い、該地点が地下水移動の特異点ではないことを確認することが大切であることも示された。

(3) 北部の草原地帯であるモゴド市では、地中レーダー法および測量データを用いて、地下水深度分布を決定した。また、同市では断層構造が非常に発達しているため、2次元比抵抗映像法データを用いて地中の断層構造の模式化を行った。

図10に結果の一例を示す。図中のコンターは得られた地中の比抵抗分布を示し、赤実線は地中レーダー法による反射の強い深度＝地下水面を示す。また、青丸は地下流水音探査法による推定地下水深を示す。

図中、1,2段目はオルホン河に近い平野部で3,4,5段は斜面中～上部である。全ての地点において地下流水音が観測された。また、地中レーダー法による地下水面も同様に、全地点にて観測された。比抵抗結果より、各地点に厚い帯水層がないこと、特に斜面上部にはシート状の薄い帯水層しか存在しないことが明らかになった。

観測地のモゴドは大陸内陸のモンゴル国の中では、造山運動の活発な地域であり、断層が発達し、急峻な斜面が卓越している。図10中の2,4段目の結果でも、断層が確認された地点では、地下流水音による推定地下水面と、地中レーダー法と2次元比抵抗映像法による推定地下水面が一致していない(図10の2段目や4段目60m付近)。断層構造のため周囲と比較して水が集まりやすい、また地下水の動きが速い水みちであるため、水と岩石との

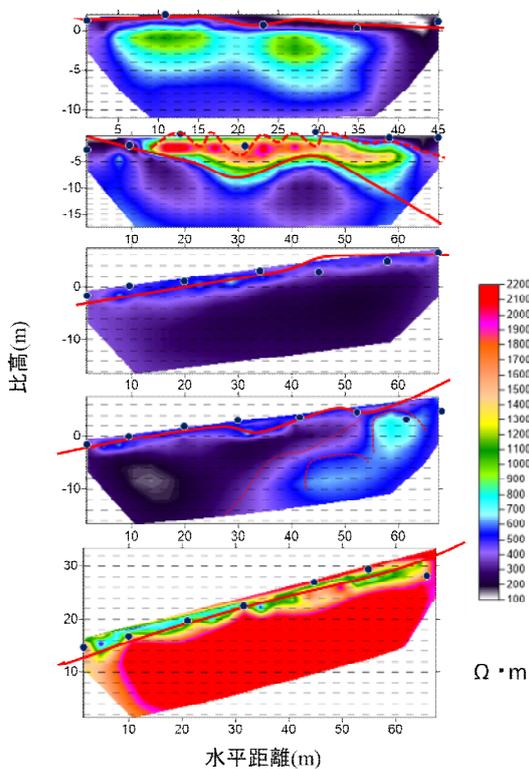


図10 亜寒帯草原地帯の地質構造と推定地下水位

の摩擦音が増加し、実際の地下水深より浅く推定されたものと思われる。その他の地点では、地下流水音データにより精度良く地下水位を推定している。

以上、(1), (2), (3)の結果から以下のことが明らかとなった。

- ・地下流水音の音圧がバックグラウンドと同程度に小さい場合、その地点には遊牧生活に必要な地下水資源は存在しないと、判断可能である。

- ・多量の降水がない半乾燥地においても、地下水が賦存し微少な地下水流動が発生しているならば、地下流水音により高い精度で地下水位を推定可能である。

- ・断層等による地下水の水みちがある場合、周囲の地下流水音と比較して不連続な値が出る。これにより地下流水音データから断層等の地質構造が判断できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

1. 筈津杏奈・齊藤忠臣・河合隆行・西本 貴之・糟谷哲史・猪迫耕二・安田 裕・塩崎一郎、鳥取砂丘におけるオアシス発生・消滅と地下水位の変動. 応用水文-28 (査読有), 2016, pp21-30
2. 粟生田忠雄・河合隆行, 複合暗渠施工水田における電気比抵抗値を用いた地下灌漑効果の可視化, 土壌水分ワークショップ論文集-2014 (査読無), 2015, pp29-32
3. Shamik CHAKRABORTY, YASUDA Hiroshi, Abhik CHAKRABORTY, NABETA Hajime, KAWAI Takayuki and ISHIYAMA Shun, The Nile and Recent Changes in Its Basin Environment: Evidences from Literature, J. Resour. Ecol., 2015 6 (5) (査読有), 2015, pp345-352

[学会発表] (計12件)

1. 河合隆行・安田 裕: 地下水の水みちを考慮したモンゴル草原地帯における浅井戸掘削最適地の判定, 鳥取大学乾燥地研究センター共同研究発表会, 2016.12.4, 鳥取県鳥取市
2. 齊藤忠臣・西本貴之・河合隆行・猪迫耕二: 小型 UAV と地中レーダーを用いた砂丘の広域地下水分布の推定, 平成28年農業農村工学会, 2016.9.1, 宮城県仙台市
3. 西本貴之・齊藤忠臣・河合隆行・猪迫耕二, 小型 UAV を用いた空中写真測量による鳥取砂丘の三次元モデリングとその利用, 日本砂丘学会第62回全国大会, 2016.8.25, 鳥根県出雲市
4. 齊藤忠臣・西本貴之・河合隆行・福間幸司・猪迫耕二・安田 裕, 小型 UAV を用いた砂丘地表面の3次元モデル作成と地下水探査, 日

本砂漠学会第 27 回学術大会, 2016.5.28, 鳥取県鳥取市

5. 安田 裕・河合隆行・Aung Din・神田道男・藤村達夫・平田経倫, ミャンマー中央乾燥帯における降雨変動・天水農業に対する影響, 日本砂漠学会第 27 回学術大会, 2016.5.28, 鳥取県鳥取市

6. 河合隆行・土屋竜太・バトユン・ツェレンプレフ・篠田雅人・森永由紀, モンゴル国における馬乳および馬乳酒の地域差, 日本砂漠学会第 27 回学術大会, 2016.5.28, 鳥取県鳥取市

7. 齊藤忠臣・河合隆行・西本貴之・笹津杏奈・糟谷哲史・猪迫耕二・安田裕・塩崎一郎, 鳥取砂丘におけるオアシス・地下水の水源と地下水分布, 平成 27 年度農業農村工学会水環境研究部会, 2015.12.7, 東京都府中市

8. 笹津杏奈・齊藤忠臣・河合隆行・西本貴之・糟谷哲史・猪迫耕二・安田 裕・塩崎一郎, 鳥取砂丘におけるオアシス発生・消滅と地下水位の変動, 平成 27 年度農業農村工学会水環境研究部会, 2015.12.7, 東京都府中市

9. T. Nishimoto, T. Saito, A. Notsu, T. Kawai, K. Inosako, H. Yasuda and I. Shiozaki: Fluctuation and distribution of groundwater level around the oasis in the Tottori sand dunes. Proceedings of AFELiSA, The International Joint Symposium between Japan and Korea 2015, 2015.11.20, Tottori, Japan

10. 笹津杏奈・齊藤忠臣・河合隆行・西本貴之・猪迫耕二, 鳥取砂丘におけるオアシスと地下水の水位変動, 第 70 回農業農村工学会中国四国支部講演会, 2015.10.7, 広島県広島市

11. 粟生田忠雄・河合隆行: 重粘土水田における電気比抵抗値を用いた地下灌漑土壌水の可視化, 平成 27 年農業農村工学会, 2015.9.3, 岡山県岡山市

12. 西本貴之・齊藤忠臣・笹津杏奈・河合隆行・猪迫耕二・安田裕二・塩崎一郎, 鳥取砂丘におけるオアシス及びオアシス周辺の地下水位変動と分布, 日本砂丘学会第 61 回全国大会, 2015.8.10, 青森県青森市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 隆行 (KAWAI, Takayuki)

鳥取大学・乾燥地研究センター・プロジェクト研究員

研究者番号 : 20437536

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :

### (4) 研究協力者

( )