

第3章 鳥取砂丘の自然電位分布から地下水を探る —繰り返し測定（2014 から 2015 年度）からみえたこと—

塩崎一郎

1. はじめに

鳥取砂丘の起伏の象徴である第二砂丘列、いわゆる馬の背の南側の凹地に季節によりその姿を変化させるオアシスがある。このオアシスが如何なるメカニズムで発生・消滅しているのか、オアシスへ注がれる流入水はどこからきて、どこへ流出するのか。

このオアシス湧水に関する問いかけは古くからの学術的関心事項であり、これまでに、いくつかの考え方が提出されている(例えば、赤木(1991)、財団法人自然美化管理財団(1995)、星見(2009)など)。

鳥取砂丘では、自然環境について、人為的な影響が生じないように厳しく管理され、井戸などの設置や大型測器による地下水位探査を実施するためのハードルが極めて高くなっている。この制約条件のもと、鳥取砂丘の地下構造研究の観点では、基盤構造の解明のために、電気探査ならびに微動探査等の物理探査法をもとにした研究(小玉, 2007)や、砂丘堆積物の内部構造の解明のために、地中レーダ探査が導入された(田村他, 2010)。今後、新たな学術上の発展が期待される分野といえる。

筆者らは、砂丘内湧水(オアシス)の起源を定量的に解明するために、様々な非破壊的な物理探査法ならびに水文学的手法を用いて、鳥取砂丘の地下構造と地下水大循環に関する調査研究を実施した(塩崎他, 2013)。(以降、本稿ではこの研究報告を先行研究と記す。

また、用いられた具体的な調査研究内容等は同著を参照されたい)

先行研究では、「降水が砂丘砂に浸透し、地下水となる。その一部は火山灰層を主体とする帯水層に導かれ、宙水として、オアシス湧水へ注がれる。オアシス湧水は馬の背の地下を越えて海へ注がれる。オアシス湧水と多鯰ヶ池の水には同時刻的・直接的関連はみられない」ということを示唆する研究成果が導かれた。

また、未解決課題として次の3点が残された。

- (1)オアシス湧水をガイドする火山灰層の潜在性と砂丘下の広域的地下水系との関連性、
- (2)より長い時間軸で考えた場合のオアシス湧水や多鯰ヶ池の関連性と流出経路、
- (3) (2)をふまえた砂丘内湧水の起源とオアシス発生の議論

これらの長期的・広域的な3つの課題の内、直接(1)、(2)に関連する鳥取砂丘の広域的地下水の存在形態の解明のために、筆者は、特別な測定機器を要さない上、誰にでも実施可能な探査手法である自然電位法を用いた調査研究に継続して取り組んでいる。本稿では、鳥取砂丘の広域の地下水位分布の解明を目的として繰り返し実施した自然電位の測定結果からみえてきた新知見を報告する。

2. 鳥取砂丘の地下模式柱状図

本稿の主題に入る前に、総合的な地質学的

研究成果を取り入れた赤木（1991）による模式柱状図（図 1）に触れておきたい。この柱状図では、基盤岩類の上、砂丘砂中に鍵層として、上部を新砂丘、下部を古砂丘と識別する、主に大山火山を起源とする大山倉吉軽石（DKP）他の火山灰層の存在と、その火山灰層中に粘質火山灰土、粘質ローム、粘土などの難透水性の層と軽石などの比較的透水性の良い層が存在する可能性が示されている。

従って、砂丘域全体として広域の地下水の存在形態を明らかにするためには、保水性の良くない砂丘砂に浸透した降水が、水を通さない基盤岩の不透水層や透水性の悪い火山灰層の付近に地下水として貯留する（財団法人自然美化管理財団（1995））という考え方を参照しつつ、降雨がどのように砂丘下の地下水位の変動に影響を及ぼすのかを定量的に関連づける調査研究が求められる。本研究では、地下水位に密接に関連する物理量としての自然電位分布の時間変動の特徴を理解することは重要な意味を持つと考えた。

3. 自然電位と鳥取砂丘の自然電位分布を用いた地下水位深度推定の試み

3-1 自然電位と先行研究の概要

本節では、最初に、自然電位について石戸（1998a,b）を参考に、その概要を説明する。次に、この先行研究において、自然電位法を砂丘域での地下水位調査にどのように適用しようとしたのかに焦点を当て、その研究成果に触れる（なお、自然電位発生及び研究の進展に関する詳細な解説は、例えば、西田（2013）によるレビュー論文を一読されたい）。

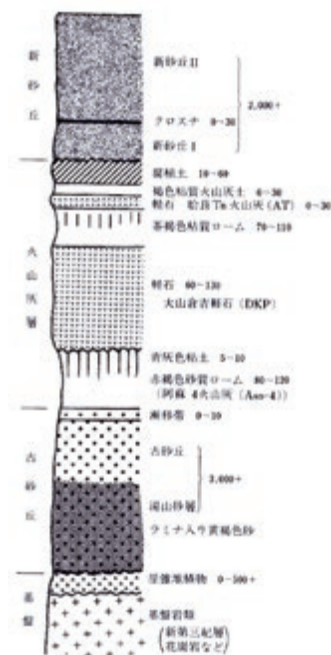


図1. 鳥取砂丘の模式柱状図(赤木, 1991)

火山灰層を中心に、砂丘は実際よりうすく示されている。数は層の厚さ(cm)を示す。

自然電位（SP, Self-Potential）は、地中の主として電気化学的なプロセスによって発生すると考えられているが、特に、本研究では、砂丘域での正と負の電荷を分離するメカニズムとして界面動電現象（流動電位）を想定している。一般に、山岳地など地形に変化のある場所で自然電位を測定した場合、標高が高い地域の SP は低電位になり、低い方が高電位になることが知られている(地形効果)。これは地形の起伏に伴う地下水の流れによって、界面動電現象をメカニズムとして発生することに起因すると解釈されている。

先行研究では、鳥取砂丘のような地質の一樣性が示唆されるところでは、比抵抗構造が一樣であれば、電位の低下は地下水位の高度に比例するという地形効果の性質を利用した。

すなわち、均質砂丘砂中に不飽和帯と帯水層が存在する単純なモデルの存在が仮定できるとして、砂丘上の 2 地点間で測定された SP とその 2 地点での砂丘表面から帯水層上面までの層厚の間に線形関係が成り立つことを根拠 (Zlotnicki and Nishida, 2003) として、鳥取砂丘において自然電位法を用いた地下構造 (地下水) 調査の有効性を検討した。

具体的には、鳥取砂丘において自然電位法を用いて地下水位の分布形状を推定する試みとして、全域並びにオアシス周辺域での自然電位測定を実施し、自然電位と標高の相関関係の有無を確認し、そして、両者の線形関係を示す指標としてその傾き (地形効果) を砂丘全域の調査データから最小二乗法的に推定した。推定された地形効果の係数を用いて、Zlotnicki and Nishida (2003) に記された均質地下構造中に不飽和帯と帯水層が存在するという単純なモデルに適用できる簡便な手法を適用し、砂丘域で飽和地下水帯の上面深度の推定を試みた。

そして、その推定結果と僅か数例ではあるものの砂丘域で実施された学術ボーリング (全く同じ場所で得られた結果ではないが、近傍のボーリングデータを利用した) から導かれた地下水位深度とを比較した。その対比結果によると、両者の差の最大値は 4m、平均するとその差は 2m 以内で収まる程度の値であり、概ね地下水位の深浅の傾向は、自然電位測定結果から矛盾なく推定されることが示された。この結果を受けて、鳥取砂丘域での自然電位測定が大局的な地下水位分布形状の推定に有効である可能性が初めて示された。

3-2 繰り返し自然電位測定の必要性

さて、自然電位法を用いて推定された砂丘全域の地下水位深度と学術ボーリングデータにより得られた地下水位深度が一致しない原因はどこにあるのだろうか。換言すれば、鳥取砂丘において自然電位分布を用いてより正確な地下水位分布推定を行うために解決すべき課題とはなにか。

先行研究で適用した単純なモデルに適用できる簡便な手法がこの目的で適用できたとしても、前節で比較した両データがサンプルされた時期が異なる事実を考慮すれば、砂丘地形や地下水位そのものに差異が存在した場合には、測定された自然電位にもその影響が及ぶことは避けられないだろう。

この点を評価するために検討すべき課題として、次の各点を想定し、これらが解明できれば、砂丘下の地下水位の挙動を自然電位の変化として検出できる可能性が現実的になると考えた。

- (a) 自然電位の変動
- (b) 地下水位の変動
- (c) 自然電位の変動と降水量の関連
- (d) 地下水位の変動と降水量の関連
- (e) 砂丘地形の変動

本研究では、鳥取砂丘 (いわゆる、観光砂丘) 内の地下水位に関する連続測定記録が未取得である現状を考慮し、最初に検証すべき作業仮説として、先行研究で用いた単純なモデルが成立するとして、「自然電位の変動は砂丘の地下水位の変動に起因する」という仮説を立て、それを検証するために、鳥取砂丘の地下水位分布を推定する上で鍵となる自然電位の測定値に含まれる変動成分に関する上記 (a) (c) の調査研究に着手した。

当然のことながら、降水量変動は、直接、地下水位変動に影響を及ぼす。そして、地下

水位が変動すれば、それに対応して自然電位測定値には変動が起こるはずである。従って、地下水位変動と密接に関連する量としての降水量に着目した。そして、一方で、この作業仮説の妥当性を検討するためには、繰り返し自然電位測定が必要不可欠であると考え、次節の方法でそれを実施した。

3-3 繰り返し自然電位測定の概要

鳥取砂丘の大局的な自然電位分布の定常性ならびに変動の特徴を確認するための自然電位測定を、先行研究をふまえて鳥取砂丘景観保全協議会が砂の移動調査のために設置した観測杭を利用して、原則としてK測線の観測杭(K2からK15、正確には杭の南側50cm地点を中心点として)において約1ヶ月毎に実施した(図2)。自然電位の測定には、デジタル・ボルトメータと電線、そして、分極による影響を少なくするために、1対の鉛-塩化鉛平衡電極を用い、先行研究と同様に、自然電位の基準点をK11地点に設定した。



図2. 鳥取砂丘における観測杭位置図

この観測杭は鳥取砂丘景観保全協議会が砂の移動調査のために設置したものである。

自然電位の時間的な変動と降水量の関係を議論するためには、観測地点近傍の電位勾配や突発的な外部擾乱、電極の設置状態に起因する問題等の影響を受けにくい測定を実施することが重要である。そこで、2015年度以降の各測定地点での計測では、次のような手順と測定終了条件を採用した(2014年度以前は各観測地点で±1mV以内に収まる5個のデータの平均値を得るだけであった)。各観測杭の南側50cmを測定中心点とし、その周りに電極が隣接するように東西南北の4点の合計5点を選定した(各点では5回ずつの測定を行う)。測定終了条件として、少なくとも測定中心点とその周りの2点で得られた3点×5個ずつの全データのばらつきが±1mV以内に収まることとした。そして、これらの15個のデータの算術平均により各測定地点の自然電位測定値を求めた。ただし、稀に、最初の3点でこの条件を満たさない場合は、最大で上述の5点のデータを測定したが、結果として、いずれかの組み合わせにより、上の測定終了条件は満たされることがわかった。

このようにしてK測線に関して得られた、2014/6/26～2016/3/2までの約1ヶ月毎の繰り返し自然電位測定結果のグラフを図3に示す。先行研究で既に指摘されたように、K測線における大局的・空間的な自然電位分布の特徴が定常的に保存されることが図3から確認できた。また、観測杭毎に時系列で自然電位変動をグラフ化したものを図4に示す。観測地点毎の時系列記録を用いて変動を見た場合、概ね調和的な変動がみられるものの、その特徴を詳しくみると必ずしも全地点での変動が調和的ではなく、変動様式(変動の振幅や位相)が共通するエリアが存在することもわかった。このことは、鳥取砂丘の地下水位

分布や地下水循環システムが必ずしも単純なものではないことを示唆する研究資料と考えられる。本研究ではこの特徴については詳細に取り扱っていないが、今後取り組むべき発展が期待される研究対象であるといえよう。

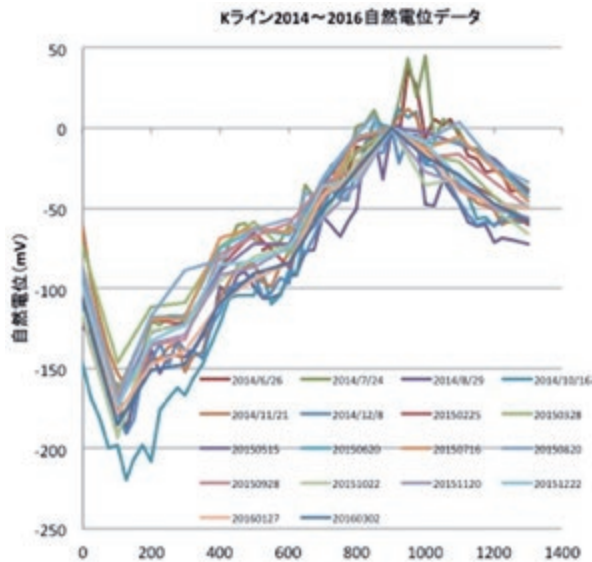


図 3. K 測線の繰り返し自然電位測定値

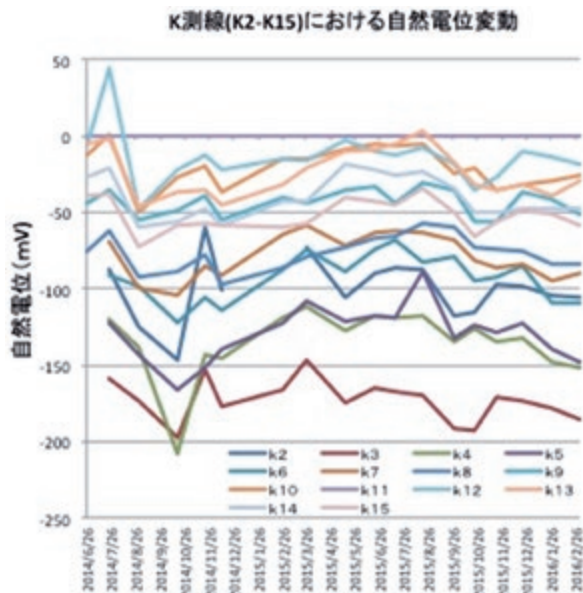


図 4. K 測線 (K2-K15) 観測杭毎の自然電位変動

3-4 自然電位変動と降水量の関係

「自然電位の測定結果の変動は砂丘の地下水位の変動に起因する」という作業仮説の妥当性を検討するためのひとつの試みとして、自然電位変動と気象庁により提供されている降水量データとの相関関係を次の処理方法で調べた。データは国土交通省気象庁ホームページより過去の気象データ・ダウンロード頁 (<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>) から、鳥取地点の日毎の降水量データを選択・取得した (閲覧日 2016 年 3 月)。

(1) 積算降水量

星見(2009)は鳥取大学乾燥地研究センター内に常時湧出しているオアシスの湧水量と降水量との関係について鳥取大学乾燥地研究センター矢野友久氏の観測結果と見解をもとに、注目すべき次の 3 点を記し、これらを根拠として、鳥取砂丘には「渇水期には蓄えられている地下水で水量を維持し続けるだけの水が供給され、その能力が 3~4 ヶ月に及び、その後渇水の影響が表れてくる」と指摘した。

- ①大雨の降雨が湧水の増加となって現れるには少なくとも 1 ヶ月かかり、その影響は 3~4 ヶ月続く。
- ②渇水の影響は 3~4 ヶ月後に現れる。
- ③例年の観測結果では 3 月に最大湧水量、年末前後に最小湧水量を示す。

本研究では、その指摘事項を参考にして、降水が湧水 (地下水) に数ヶ月の単位で影響を及ぼす可能性を考え、鳥取砂丘にある特定期間の降水の総和が地下水位に影響を及ぼすとともに、それが自然電位変動をもたらすことを想定し、その影響を議論するために、新

たに積算降水量という量を導入した。この積算降水量は、砂丘における自然電位の測定日の X ヶ月前から Y ヶ月前迄の特定期間（月単位）に降った降水量の総和をもって定義した（なお、1 ヶ月は 30 日とした）。X, Y は、それぞれ、次式を満たすものとして、2014, 15 年度に実施された全ての自然電位測定日に対して、X, Y 全ての組み合わせについて積算降水量を計算した。

$$1 \leq X \leq 14$$

$$0 \leq Y \leq 6$$

ただし、 $X - Y \leq 8$

(2) 相関関係について

自然電位の変動と積算降水量の変動との関連の有無について調べた。調査方法として、K 測線上の全ての観測地点（K2-K15）で 2014 から 2015 年度に得られた自然電位測定値と上述の積算降水量との関連について、上(1)で示した全ての組み合わせに対してマイクロソフト社のエクセル・アプリケーションを用いて、相関関係の程度を表す指標として相関係数を計算し、最も相関が高かった X, Y の組み合わせとその時の相関係数を求めた（表 1）。

その結果、K 測線上の全ての観測地点（K2～K15）に関して、2014 年度及び 2015 年度に得られた自然電位の測定値と積算降水量との間に正の相関関係が示唆されることがわかった。同時に、半数を超える観測地点において、相関係数が 0.7 を超える、X, Y の組み合わせが存在することもわかった。これらの観測地点では、自然電位測定日を遡ること 8～9 ヶ月前以降、3～5 ヶ月前迄の積算降水量と自然電位変動の間に相関関係の存在が示唆された。

表 1. 観測杭毎の自然電位変動と積算降水量の相関関係とそれをもたらした降水量累積期間

観測地点	X ヶ月前以降	Y ヶ月前迄	相関係数 R
K2	8	3	0.58
K3	8	3	0.64
K4	8	5	0.71
K5	8	5	0.72
K6	9	5	0.78
K7	9	3	0.83
K8	9	5	0.46
K9	9	3	0.51
K10	8	3	0.69
K12	11	5	0.43
K13	9	4	0.73
K14	9	4	0.72
K15	10	4	0.54

ここでは、観測点の中から相関係数が最も高い K7 地点を選び、その相関関係を図 5 に示したが、図示される通り明瞭な正の相関関係が示唆された。

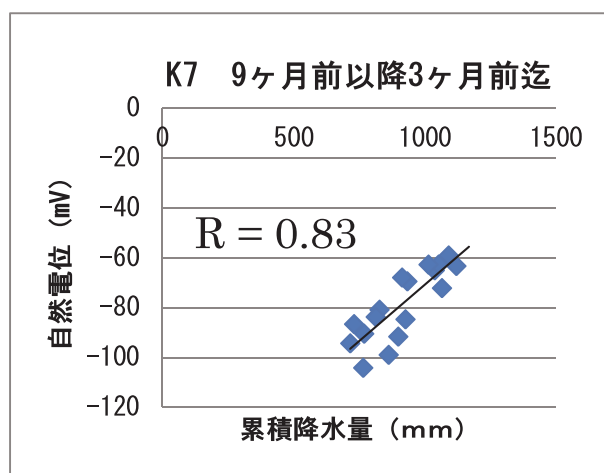


図 5. 代表的な観測点 K7 に関する自然電位と積算降水量との相関関係図。

さらに、この相関関係を視覚的に確かめるためにこの地点について自然電位と積算降水量の変動を時系列として図6に示した。図示されるように自然電位の変動がある特定期間の積算降水量の変動と調和的であることが示された。

これらのことは、半数を超える地点では「自然電位の測定結果の変動は砂丘の地下水位の変動に起因する」ことを示唆する結果と解釈できそうだ。また、Yの最小値が3ヶ月であることから、この作業仮説が正しいとするならば、自然電位測定日の少なくとも3ヶ月前迄の降水量は飽和地下水帯の水位変動に強く影響を及ぼさないことを示唆する。さらに、相関が示唆される降水量の累積月数は3~5ヶ月となり、星見(2009)の取り纏めとも概ね調和するという結果を得た。

4. おわりに

本研究を通して、「自然電位の測定結果の変動は砂丘の地下水位の変動に起因する」という作業仮説の妥当性を検討するためのひとつの試みとして、K測線の各地点において約1ヶ月毎に実施された繰り返し自然電位測定データと積算降水量データとの相関関係を調べた。その結果、自然電位測定日より3ヶ月前を起点として約半年間遡った期間の積算降水量と自然電位変動に正の相関関係が示唆される観測点が多く存在することが明らかになり、仮説の妥当性が示唆された。また、自然電位測定日の少なくとも3ヶ月前迄の降水量は飽和地下水帯の水位変動に影響を及ぼさないこと、さらに、自然電位に影響を及ぼす積算降水量の累積月数は3~5ヶ月となることが示唆された。

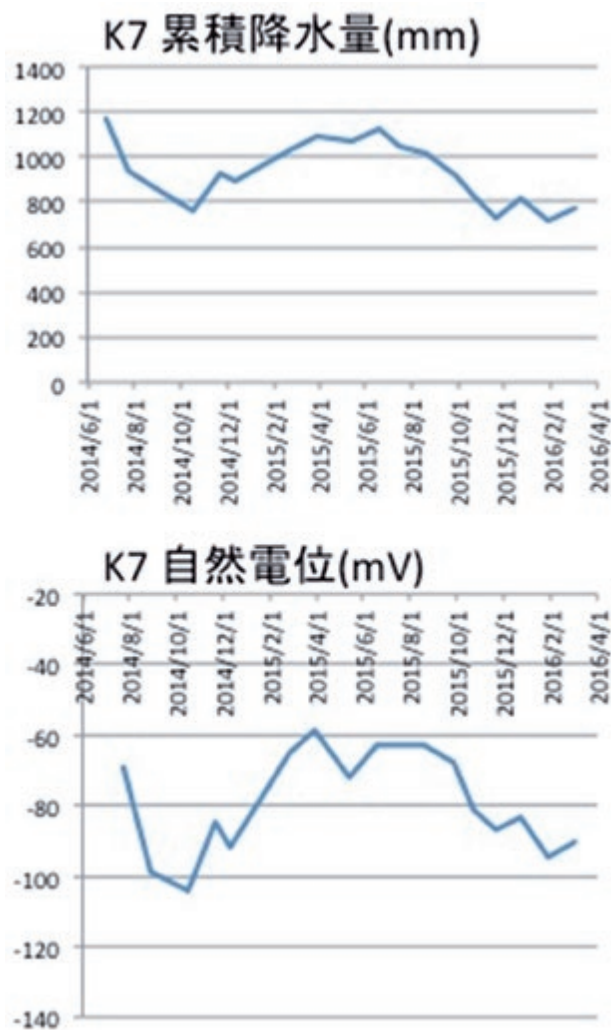


図6. K7地点で測定された自然電位変動（上図）と積算降水量変動（下図）

以上より、自然電位研究を通して、砂丘域全体として広域的な地下水位の変動を考えた場合、砂丘に降った雨水が降下し、飽和地下水帯に完全に影響を及ぼすまでに少なくとも3ヶ月の期間を要する。そして、その降雨の影響による地下水位の変動は3~5ヶ月の期間持続（貯留）するという砂丘の広域的な地下水循環モデル像が示唆された。

この鳥取砂丘における広域的な地下水循環モデルをより確かなものにするために、この

自然電位研究からみえてきた降水・地下水位・自然電位の変動モデルの妥当性を、より精度を上げて検証することが肝要である。

例えば、本調査研究では、鳥取砂丘の地下水位変動との相関を調べた降水量データは、砂丘の約 6km 南に位置する鳥取地方気象台で取得されたものである。加えて、本研究で最も重要な役割を担う鳥取砂丘の地下水位のデータが欠如している。さらには、相関関係を調査するために導入した積算降水量は月単位毎の概算的な計算値で評価する等、本研究の精度向上のために改善すべき課題が存在している。

ただし、景観保護の観点から鳥取砂丘（いわゆる観光砂丘）における調査研究活動は制約のもと実施することが求められる。従って、課題を解決するためには、例えば、保護対象区域外の鳥取砂丘エリアにおいて、自然電位と降水量、そして、地下水位を、同時に、かつ、同じエリアで測定する等、データ取得の観点で研究の精度向上に直接的に繋がる可能性がある取り組みを早急に実施することが重要である。

5. 謝辞

本調査研究では、鳥取大学工学部土木工学科に在籍した濱田哲好・吉野空木の各氏が、卒業研究の一環として、取得したデータ（濱田(2015)、吉野(2016)）に、2015年12月以降2016年3月までに新たに取得・追加されたデータを使用した。自然電位測定やデータ処理・解析において、両氏には多大なるサポートを頂いた。ここに記して謝意を表す。

文献

- 赤木三郎（1991）：砂丘のひみつ，170pp.，青木書店
- 財団法人自然公園美化管理財団（1995）：鳥取砂丘，新・美しい自然公園 13，財団法人自然公園美化管理財団
- 小玉芳敬（2007）：鳥取砂丘の地下地質構造の解明と地形発達史の模索，pp.67-81，山陰海岸国立公園鳥取砂丘保全調査報告書，鳥取砂丘保全協議会
- 田村亨・小玉芳敬・齋藤有・渡辺和明・山口直文・松本弾（2010）：鳥取砂丘の地中レーダ断面，第四紀研究，19,(6)，pp.357-367
- 塩崎一郎・河合隆行・野口竜也・齊藤忠臣・香川敬生・神近牧男（2013）：鳥取砂丘の地下構造と地下水大循環に関する研究－砂丘内湧水(オアシス)の起源を探る－（縮約版），山陰海岸国立公園鳥取砂丘景観保全調査報告書（2013年3月31日）鳥取砂丘再生会議（保全再生部会）
- 石戸経士（1998a）：「2.2.2自然電位」，p.247，第5章電気探査，物理探査ハンドブック，物理探査学会
- 石戸経士（1998b）：「5.2自然電位法」，pp.285-286，第5章電気探査，物理探査ハンドブック，物理探査学会
- 西田泰典（2013）：自然電位と地殻活動，北海道大学地球物理学研究報告，No.76，March，pp.15-86
- Zlotnicki and Nishida（2003）：Review on morphological insights of self-potential anomalies on volcanoes，Surveys in Geophysics，24，pp.291-338

星見清晴 (2009) : 多鯰ヶ池の水位変化について, 鳥取地学会誌, 第 13 号, pp.37-58

濱田哲好 (2015): 鳥取砂丘における自然電位繰り返し測定に基づく地下水位推定に関する研究, 鳥取大学工学部卒業論文

吉野空木 (2016): 繰り返し測定に基づく鳥取砂丘の自然電位変動と鳥取地方気象台における降水量変動の相関に関する研究, 鳥取大学工学部卒業論文