

第3章 鳥取砂丘の繰り返し測定に基づく自然電位分布の特徴 (2016年度—2018年度)

—電位分布から地下水を探る—

塩崎一郎・畑岡 寛

Abstract

How does precipitation penetrate underground and in what form is it stored as groundwater in the Tottori Sand Dunes? How is it related to the underground structure? To clarify these, the self-potential method was applied in the Tottori Sand Dunes. The following two points were shown from the results of repeated self-potential measurements carried out at the Tottori Sand Dunes. (1) From the correlation function analysis, it was reconfirmed that the characteristics of the spatial and temporal fluctuations of the self-potential in the Tottori Sand Dunes were widely common. In addition, there are some points that are not related to the behavior of other points, though it is a few points, suggesting the existence of factors that disturb the groundwater flow field. (2) It was shown that close examination of the spatial characteristics of the topographic effect is one of the important keys to improve the accuracy of groundwater level estimation using this method.

1. はじめに

鳥取砂丘に降る雨・雪，これらの降水はどのように地下に浸透し，どのような形態で地下水として蓄えられているのだろうか？それと地下構造はどのように関連するのであるか？これが本調査の研究目的である．この問いに答えるために，できれば，誰でもできる容易な手法で，砂丘景観に影響を与えることなく実施できる方法を提案したい．

この問いかけは，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研究から始まった．オアシスが如何なるメカニズムで発生・消滅しているのだろうか．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は，古くからの学術的関心事項であった（赤木（1991），財団法人自然美化管理財団（1995），星見（2009）など）．

これまでに鳥取砂丘では，基盤構造の解明研究（小玉（2007））や，砂丘堆積物の内部構造の解明のための地中レーダ探査（田村・他（2010））が実施された．近年，砂丘内湧水（オアシス）の起源を定量的に解明するために，複数の非破壊的な物理探査法ならびに水文学的手法を用いた，鳥取砂丘の地下構造と地下水大循環に関する調査研究（例えば，塩崎・他（2013），塩崎（2016），齋藤・他（2016），笹津・他（2016）等）により，そのオアシス湧水の起源や器，通路に関する議論が行われるようになってきた．

その一例として，筆者を含む研究グループによる先行調査（塩崎・他（2013））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．オアシス湧水と多鯨ヶ池の水には同時刻

的・直接的関連はみられない」ことなどを示唆する研究成果を導いた。

この調査では非破壊的とはいえ、複数の物理探査法ならびに水文学的手法が適用され、探査対象の解明を測るために、人工的な信号を大地に送信・受信するための特別な測定装置が必要となる手法も適用された。鳥取砂丘は、その環境に人為的な影響が生じないよう厳しく管理されるため、井戸などの設置や大型測器による地下水位探査の実施が適さず、仮に機材が導入できたとしても、制限付きの調査研究を必要とされる研究対象地域といえる。そういう観点では、鳥取砂丘の全域の地下構造・地下水研究は、新たな学術上の研究手法の発展が期待される分野といえよう。砂丘という自然環境の特殊性を最大限に活かし、かつ、先述の環境への配慮を考慮し、大掛かりな装置を必要としない、簡便な地下構造(地下水)調査手法の開発が期待される。

後述するように、複数の非破壊的物理探査法のひとつである自然電位法を調査手法候補とした調査研究を進めている。例えば、鳥取砂丘において自然電位法を用いて得られた一つの調査結果(塩崎(2016))は、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こと、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)することなど、砂丘の広域的な地下水循環モデル像を示唆した。

2016年度以降、この鳥取砂丘における広域的な地下水位の推定精度および地下水循環モデルをより発展させるものとして、観測杭を利用したK測線(K2~K15)において自然電位の繰り返し測定を継続実施し、砂丘における

自然電位の時間的・空間的な変動を調べた。また、2017年秋以降、新たに砂丘列の横断する測線を設定し、最大傾斜例として11測線(J11~N11)の自然電位分布データを用いて、地下水位の推定精度の向上を目的とした研究をスタートした。

ここ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(1)繰り返し測定された自然電位を時間的・空間的に概観するとともに、(2)地形効果の指標を再考した砂丘下の地下水位推定例を報告する。

2. 鳥取砂丘の地下模式柱状図

地下構造モデルとして赤木(1991)による総合的な地質学的研究成果を取り入れた模式柱状図(図1)を参照することで、鳥取砂丘の広域の地下水位分布に影響を与える主要素を考

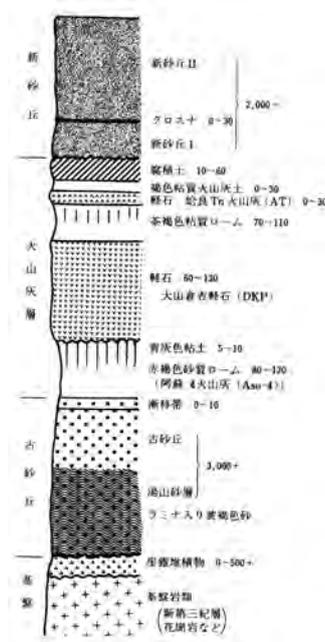


図1. 鳥取砂丘の模式柱状図(赤木(1991)):

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。

える。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、粘土等の難透水性の層と軽石等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、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))という概念をもとに、ここでは降水の砂丘下の移動形態や、地下水位変動への影響に関する定量的な調査研究が求められる。

3. 鳥取砂丘の自然電位分布の特徴と地下水位深度推定の試み

3-1 自然電位の概要と先行研究の成果

地下水の流れ場に密接に関連する唯一の物理量としての自然電位と、その分布の時間的・空間的変動の特徴を理解することは重要な意味を持つ。本節では先行報告(例えば、塩崎・他(2013))にならい、石戸(1998a, 1998b)を参考に、自然電位の発生メカニズムについて説明する。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)。

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。

先行調査(塩崎・他(2013))では、鳥取砂丘において自然電位法を用いた地下水位の分布形状を推定する試みとして、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(地形効果を表す係数)を推定し、Zlotnicki and Nishida(2003)で提示された地下均質媒質中に不飽和帯と飽和地下水帯が存在するという単純なモデルを仮定し、地下水位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から導かれた地下水位深度とを比較し、概ね地下水位の深浅の傾向は、自然電位分布から矛盾なく推定されることから、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を初めて示した。

3-2 繰り返し自然電位測定の概要

鳥取砂丘における自然電位を用いた広域的な地下水位の推定精度および地下水循環モデルをより確かなものにするために検討すべき課題とは何か? 塩崎(2016)は、いくつかの候補を挙げ、その中の一つとして、砂丘における自然電位の時間的・空間的な変動を理解することが重要な鍵となるとして、繰り返し自然電位測定の必要性を指摘した。その詳細は同報告に譲るが、本節では、2016年度以降に取り組んだ繰り返し測定の概略を述べる。

先行調査をふまえ、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地点として、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た(図2)。先述のように、2016年度以降、既存の研究を発展させるものとして、観測杭を利用したK測線(K2~K15)上において約1ヶ月毎の自然電位の繰り返し測定を継続実施し、砂丘における自然電位の時間的・空間的な変動を調べた。また、新たに2017年秋以降、試験的に11測線を加え(2018年度より定期的)、砂丘列の横断する測線を設定し、最大傾斜方向の自然電位分布データを用いて、地下水位の推定精度の向上を目的とした研究をスタートした。



図2. 鳥取砂丘における観測杭位置図：
観測杭(測線の交点)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た。自然電位測定システムの基準点はK11地点近傍に設定した。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(各点では

5回ずつの測定を行う)を選定・測定を行い、これらの25個のデータの算術平均により各測定地点の自然電位データとした。

このようにしてK測線に関して得られた、2016年4月~2019年3月までの3年間の繰り返し自然電位測定結果のグラフを図3-1, 2に示す。

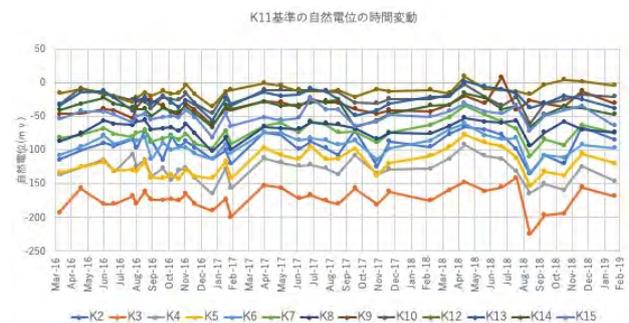


図3-1. 繰り返し測定に基づくK測線観測地点(K2-K15)毎の自然電位時間変動(2016年4月から2019年3月)：
縦軸はK11を基準点とする自然電位の値を示し、横軸は時間軸を示す。

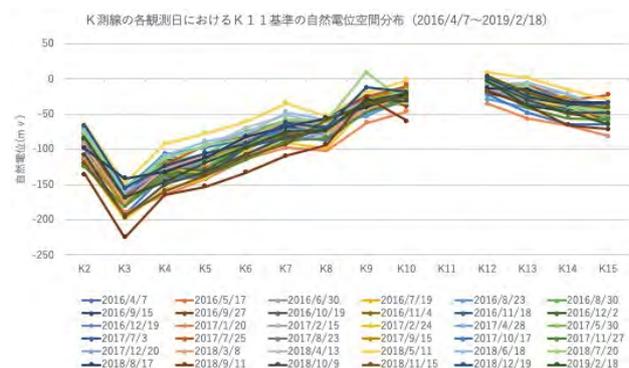


図3-2. K測線の自然電位空間分布(2016年4月から2019年3月)：
縦軸はK11を基準点とする自然電位の値を示し、横軸はK2を左端、K15を右端とする水平位置(各観測点間距離は100m)を示す。

先行調査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この図 3-1 から確認できる。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 3-2 に示す。こちらも先行調査で指摘されたように、観測地点毎の時系列変動を見た場合、概ね調和的であるものの、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いことや、変動様式（変動の振幅や位相）の共通するエリアが存在することなども再確認された。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、局所的には必ずしも単純なものではないことを示唆する貴重な研究資料と考えられる。

村山（2019）は、これらの点に着目し、K 測線に関して自然電位の空間的分布特性を地点毎の相関係数を推定することにより調べた。また、別観点の調査研究として、地下水位の推定精度向上の取り組みに関して、既存の手法を発展するものとして、他の物理探査結果を利用した試験的研究（松下（2019））がなされた。これら二つの興味深い研究に関しては、鳥取砂丘の広域の地下水位分布の解明を目的として実施された(1) 自然電位の繰り返し測定結果を時間的・空間的に概観するとともに、(2) 地形効果の係数を用いた砂丘下の地下水位推定精度向上の検討結果を 3.3 節ならびに 3.4 節において報告する。

3-3 K測線における空間的自然電位変動の特徴

繰り返し測定された自然電位を用いて、砂丘K測線に関する自然電位分布（K11基準）の時間的・空間的特徴は次の通りである。

a) 砂丘K測線において繰り返し測定された自然電位の時間的変動は、ほぼ全点で調和的である（図3-1）。

b) 砂丘K測線における繰り返し自然電位測定結果の空間的分布形状は全期間を通してみれば、多少の変動はあるものの調和的である（図3-2）。

c) K9ならびにK12地点を除く各地点の相対的な自然電位変動は他のすべての砂丘K測線上の地点の自然電位変動と相関が高いが、K9ならびにK12地点では相関が低い（表3-1）。

表3-1. 測定地点毎の自然電位変動の相関係数：赤色は相関係数が0.7以上の組み合わせを示す。橙色は0.4～0.7、茶色は0.2～0.4を示す。（村山（2019）より引用）

	k2	k3	k4	k5	k6	k7	k8	k9	k10	k11	k12	k13	k14	k15
k2	1.00													
k3	0.81	1.00												
k4	0.55	0.77	1.00											
k5	0.55	0.47	0.59	1.00										
k6	0.51	0.50	0.44	0.44	1.00									
k7	0.54	0.55	0.50	0.50	0.57	1.00								
k8	0.41	0.38	0.42	0.45	0.44	0.55	1.00							
k9	0.45	0.23	0.34	0.31	0.11	0.23	0.10	1.00						
k10	0.44	0.18	0.24	0.18	0.18	0.18	0.18	-0.09	1.00					
k11	0.26	0.15	0.18	0.20	0.17	0.25	0.41	0.15	0.17	1.00				
k12	0.11	0.15	0.22	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.33	1.00			
k13	0.18	0.15	0.20	0.20	0.18	0.17	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	1.00		
k14	0.18	0.15	0.20	0.20	0.18	0.17	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	1.00	
k15	0.21	0.15	0.20	0.20	0.18	0.17	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	1.00

上のa), b)に示される特徴はこれまでの砂丘調査研究で既に指摘されたことであるが、c)で示される特徴は、各地点における相対的な自然電位変動の相関関係を検討した結果、村山（2019）により新たに示された知見である。これは、既存の知見a), b)で示された特徴を地点間毎の相関を調べることで定量的に表現したものといえる。K9ならびにK12地点と他地点との相関の低さは、これら2地点の地下あるいは周辺域に、水の流れ場を変化させることで自然電位分布を乱す要因の存在が示唆される。例えば、植生分布や火山灰層の分布状況の変化、地表付近での潜在的不均質構

造の変化などがその候補に挙げられるであろう。

3-4 11測線における自然電位分布を用いた地下水位推定法の精度向上に関する試み

2017年9月以降、既存のデータが活用できるK測線に関する調査研究に加え、その測線に直交する11測線においても、おおよそ1ヶ月毎の自然電位の繰り返し測定を開始した。この11測線の選定には、オアシス湧水周辺域であり、かつ、砂丘列に直交する走向（すなわち最大傾斜）を有し、過去に実施された電気探査(太田(2010))やレーダー探査(齊藤・他(2016))による地下構造に関する知見の存在を考慮した。特に、ここでは自然電位の空間的な特徴に注目し、地形効果の指標を用いた砂丘下の地下水位推定精度の向上に着手した。

松下(2019)は、自然電位の地形効果の影響が同一である区間を検討するという中西(2018)の方法にヒントを得て、測点間隔をより短くして自然電位の地形効果の影響が同一である区間を精査した。その結果、J11からM11測線間においては、3つの地形効果の係数が存在する可能性を見出した(図3-3)。

これらの係数を用いて11測線下の地下水位を推定した。3-1で述べた手法では、地下水位を推定する際に、計算上、地形効果の係数とその係数が適用できる1地点の地下水位深度データが必要となるため、地形効果の係数の個数に対応した個数の地下水位データを既存のレーダー探査結果を参照して適用した。その結果、推定された地下水位を図3-4に示す。新しい手法による推定結果は、既存の電気探査ならびにレーダー探査により得られた地下水位と良い対応関係がみられた。また、

その知見に加えて、他の物理探査から推定されていないM11～N11区間においても地下水位深度が新たに推定された。

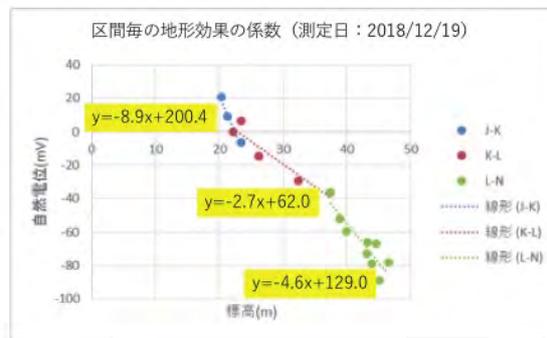


図3-3. 区間毎の地形効果の係数の決定例：
2018年12月19日に測定された自然電位測定データを用いて3つのJ-K,K-L,L-N区間に対して決定された地形効果の係数を表す。(松下(2019)より図を引用・加筆したもの)

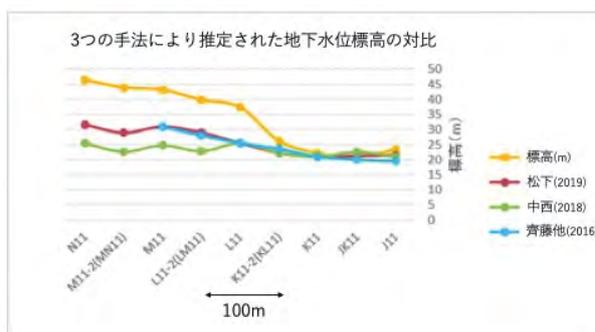


図3-4. 3つの手法により推定された地下水位標高の対比：
松下(2019)の地下水位標高の推定結果を中西(2018)ならびに齊藤・他(2016)のレーダー探査結果と対比したもの。同一の地形効果が及ぶ区間を精査することでレーダー探査結果と調和する推定結果を得た。(松下(2019)より図を引用・加筆したもの)

この研究成果から、鳥取砂丘においては、自然電位データに含まれる地形効果の空間的特徴を精査すること、すなわち、今回のように測定間隔長の再検討を含めて、自然電位の空間的特徴を精査することが、地下水位の推定精度向上に繋がる一つの重要な鍵になることが示された。

4. おわりに

鳥取砂丘における繰り返し自然電位測定結果から次の2点が示された。

(1)鳥取砂丘における自然電位の空間的・時間的変動の特徴は広範囲で保存されることが再確認された。

(2)自然電位データに含まれる地形効果の空間的特徴を精査することが同手法を用いた地下水位の推定精度向上に繋がる一つの重要な鍵になることが示された。

ただし、(1)に関しては、K測線上のK9やK12地点のように測定データの時間的・空間的変動が他の地点の挙動と相関がみられないところも存在する。同手法の適用限界を考える上で重要な知見である。鳥取砂丘では、火山灰の露出やその潜在性、植生分布、地下構造の不均質性の存在などが地下水の流れ場と密接に関連し、それらに強く影響する要因となる可能性がある。今後研究が進められるべき調査対象のひとつとなるであろう。

また、(2)に関しては、地形効果の係数を精査することは同時に、精査の結果得られた係数に対応する個数と同数の地下水位標高データを他の手法や仮定をもとに与えなければならない。このことはこの手法の限界であり、同時に、利点である簡便性を損なうことを意味する。今後の検討課題といえる。

ところで、鳥取砂丘の地下水位変動と砂丘周

辺の降水量、それに起因する自然電位変動に関する定量的相互関連調査研究については、新しい知見を提出できてない。その基礎となる降水量と地下水位変動の定量的な関係性の解明に立ち返るとともに、それらの関係性に自然電位変動を結びつけることで、降水-地下水位-自然電位の変動モデルを確立できるよう歩を進めることが求められる。

K測線に加えて、2017年度の後半からは11測線の各地点においても、約1ヶ月毎に実施された繰り返し自然電位測定データが蓄積されつつある。すでに、「1.はじめに」で触れたように、自然電位研究を通して、降水-地下水位-自然電位の変動を関連づける砂丘の広域的な地下水循環モデルが示唆された調査報告もあるが、これら降水-地下水位-自然電位の3項目データ間の定量的な関係性を解明するためにも、位相差も含め、周期解析などの研究手法を用いた新たな調査研究が待たれる。

最後に、景観保護の観点から鳥取砂丘における調査研究活動は制約のもと実施されている。一方で、鳥取砂丘を市民が親しみ、科学学習の場として、砂丘景観を乱すことなく利用できる空間として考えたとき、ここで紹介した調査手法は活用が期待できる。なぜなら、自然電位(SP)調査は、身近な道具を使って、誰でもできる容易な手法で、自然環境に影響を与えることなく、砂丘下の地下水流動系や地下水位に関する情報に触れることことができる唯一の地球物理学調査手法であるといえるから。用いる電線やデジタル・ボルトメータはホームセンターで入手でき、電極も自作可能である。鳥取砂丘を散歩するかのような感覚で自然電位を測定することにより、市民の手による全く新しい砂丘の姿が提示されるものと期待される。

5. 謝辞

2018年度には鳥取大学技術部工学・情報系部門・山本真二技術職員に鳥取砂丘地形に関するGNSS測量を実施していただいた。ここに記して謝意を表する。

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

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

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・齋藤忠臣・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, (平成25年3月31日)鳥取砂丘再生会議(保全再生部会)

塩崎一郎(2016):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)から見えたこと-, pp.16-23, 山陰海岸国立公園鳥取砂丘保全調査報告書(第3号), (平成28年3月31日)鳥取砂丘再生会議(保全再生部会)

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(2016):鳥取砂丘におけるオアシス・地下水の水源と地下水分布, 応用水文, 28, pp.29-51

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(2016):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, pp.21-29

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

村山佑樹(2019):鳥取砂丘長距離測線における繰り返し測定に基づく自然電位の空間的特

徴に関する研究，鳥取大学工学部社会システム土木系学科平成 30 年度卒業論文

松下航平(2019)：鳥取砂丘における自然電位の空間的特徴を利用した地下水位推定精度向上に関する研究，鳥取大学工学部社会システム土木系学科平成 30 年度卒業論文

大田将平(2010)：比抵抗映像法を用いた鳥取砂丘火山灰露出地およびオアシス周りの地下構造に関する基礎的研究，鳥取大学工学部土木工学科平成 21 年度卒業論文

中西勁(2018)：鳥取砂丘における繰り返し自然電位測定と地下水位推定に関する基礎的研究，鳥取大学工学部土木工学科平成 29 年度卒業論文