

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26292128

研究課題名(和文) 乾燥地農業地域における砂丘地の水循環と水資源評価

研究課題名(英文) Water circulation in sand dunes of in arid agricultural area and evaluation of their water resource

研究代表者

赤江 剛夫 (AKAE, Takeo)

岡山大学・環境生命科学研究科・名誉教授

研究者番号：10123423

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：乾燥地灌漑農地の塩類地、砂丘地、草原など土地利用型の分布を標高、勾配、標高差などの地形的特徴量から推定する方法を示し、塩類地面積の経年変化を推定するとともに、砂丘と湖が隣接して立地することを統計的に示した。部分地域ブロックごとに流入と流出量の差である水収支を求めると、水収支の多いところで、砂地率や塩類地化率が大きいことが分かった。砂丘の中腹部、斜面下端、周辺地における地下水位の連続観測結果からその変動は灌漑による年間変動、降雨に伴う変動、蒸発散に伴う日変動から構成され、砂丘中腹部が灌漑水を貯留し、周辺地へ供給する役割を果たしていることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：A method to estimate of land use type such as saline lands, sand dunes, grassland etc. from topographic characteristics such as altitude, gradient and altitude difference in an irrigated arid agricultural area was developed and yearly change of saline area was estimated. It was statistically shown that sand dunes and lakes are located adjacent to each other. The water balance, which is the difference between inflow and outflow amount of water for each partial block, was found to be larger in blocks with higher area of sand dune and the saline land. From the continuous groundwater levels monitored at the middle of the dune slope, foot of the dune and the surrounding area, it was found that the variation of the levels was consisted of annual fluctuation due to irrigation, fluctuation accompanying rainfall event and daily fluctuation accompanying evapotranspiration, and that the sand dunes play roles to store the irrigated water and to supply the water to the surrounding area.

研究分野：農業土木学

キーワード：乾燥地 砂丘 塩分集積 地下水 衛星画像 水収支 地下水涵養量

1. 研究開始当初の背景

乾燥地の灌漑農業の持続性にとって塩分集積は水資源の確保とともに最も重要な問題である。土壌の塩類化はその土地の地質や地理空間的特性といった自然的要因に、不適切な水管理という人為的な条件が加わって加速される。本研究の対象である中国内モンゴル河套灌区でも、1996年時点で全面積119万haの約30%、非耕地54.5万haのうち65%の35.6万haが塩類化土壌となっている。地域全体を緑の沃野にしたいと期待しつつ、大規模な用排水システムと耕地組織を建設したはずなのに、結果として不毛な塩分集積地を生じさせてしまった現実があるのである。それでは、どのような条件の違いが塩類化土壌と非塩類化土壌とを出現させたのだろうか？塩類化の要因として、まず、その土地の地理空間的特性から塩分集積を生じた自然的な素因を確かめ、ついで誘因となる人為的な要因として用水量と排水量配分やそれに影響される蒸発散量との関係を明らかにできれば、塩類化リスクの判定およびその対策の検討に有用であると考えられる。

河套灌区には塩類化土以外にも砂丘が多く分布している。砂丘には湖が隣接（多くはその西側に）して立地することが多く、砂丘と湖に挟まれて塩分集積地が分布しているのが普通である。砂丘、塩分集積地、湖が連続する特徴的配置は、衛星写真を注意深く眺めてみても感覚的に読み取れる。このような配置構造は確かに存在していると言えるのか、灌区全体についてその事実を統計的に確認したいと考えた。

空間的自己相関に基づく分析結果は、砂丘と湖が集塊的に分布することを明らかにした。だとすれば、砂丘に隣接して存在する湖の間には地下水を通じた涵養と被涵養の関係があると考えるのは自然なことである。なぜなら、砂丘砂は保水性が小さく透水性が大きいために、降水が速やかに浸透して地下水を涵養し、その量も多い。しかも、粗大間隙が多く毛管間隙が少ないので、毛管上昇が阻害されて蒸発が少なくなる。その結果砂丘内に水が蓄積される。砂丘内中央部で水位を高められた地下水は周囲に向かって側方浸透し、周囲に透水性の低い凹地がある場合、そこに貯留されて湖を形成する。このような砂丘地と湖の間の特有の水循環特性は、地下水資源の涵養と湖への貯留という水資源生成の場としての役割を砂丘が果たしていることを意味しており、水資源利用の観点から極めて有用である。そこで、砂丘地における水の動態を現地観測の結果に即して明らかにし、水資源涵養・賦存の場としての砂丘の機能を定量的に評価しようとして着想した。

2. 研究の目的

本研究の目的を要約すると以下の通りである。

(1) 塩分集積地の立地における地形・地理

空間的特性を分析する。

(2) 砂丘と湖の特徴的立地構造を統計的に評価し、形状の特徴を明らかにする。

(3) 塩害地面積率、砂地面積率と広域水収支の関係の分析と広域水収支に基づく砂丘地の地下水涵養量を推定する。

(4) 砂丘とその周辺地域の水循環構造と水の動態を現地観測事例を通じて明らかにし、砂丘の持つ地下水涵養機能を定量的に評価する。

3. 研究の方法

(1) 地形・地理空間情報による塩分集積地立地要因の分析と砂丘と湖の立地形態の分析

平成26年度から平成28年度にかけ、全移動経路周辺の土地利用状況、作況、をデジタル写真に撮影した。移動の途中、あらかじめ定めた地点周辺において、出来るだけ多数の土壌を採取して、その塩分濃度(EC1:5)を測定する。以上の作業を通じて、フィールド情報を収集した。

河套灌区管理総局作成の土地利用図を教師とし、MODIS衛星画像、Landsat画像より、画素ごとに種々の地理空間的特性、NDVI、NDWI、蒸発散量を取得し、これらを説明変数として土地利用を予測する。土地利用の分類項目は8項目(塩害草地、宅地、宅地土、水面、農地、塩害地、砂地)とした。地形的特徴量として、標高、標高差、傾斜、曲率、累積流量、水路距離、排水路距離の計7変数とし、Nested Logitモデルで適合させた。

(2) 砂丘と湖の特徴的立地の評価と形状分析

砂地周囲の地形解析を行うため、2014年のLandsat画像を元を目視判読で砂地ポリゴンを作成した。バッファ内にポイントを設置し、1990年、2014年の土地利用、方位角を特徴量としてポイントに抽出した。砂地ポリゴンの重心を基準として7種の土地利用ポリゴンが出現する距離と方位角を分析した。

2014年Landsat画像から目視で作成した砂地ポリゴンと湖ポリゴンの重心にポイントを設置し、両者の間の空間的自己相関分析を行い、砂地と湖の隣接性の有無を検討した。空間的自己相関の有無を分析する手法として、Global Moran's Iを用いた。

(3) 塩害地面積率、砂地面積率と広域水収支の関係の分析と広域水収支に基づく砂丘地の地下水涵養量の推定

土地利用図(1998年発行)の用水路と排水路のラインデータをもとに河套灌区全域に用水路ブロックと排水路ブロックを設定した。MODISのグローバル蒸発散プロダクトから蒸発散量をGSMapのGSMap reanalysis gaugeから降水量をダウンロードし、ブロックごとの用水量と排水量資料(1993年と1998年)を使用し、水収支(=浸透量)=用水量+降水量-排水量-蒸発散量を計算した。ブロック単位の水収支については各種土地利用

用面積率を説明変数とした単相関係数を分析し、画素単位の水収支については各種土地利用面積率を説明変数とする重回帰分析を行い、偏回帰係数を分析した。ついで、灌区全体に対する画素単位での広域水収支マップを作成し、広域水収支からみた砂丘の地下水涵養量を推定した。農地が経年的にどのような土地利用に変化したのか、水収支を説明変数とする多項ロジットモデルで解析した。塩害草地の経年的な土地利用変化と水収支の関係について同様の解析を行った。

(4) 砂丘とその周辺地域をめぐる水循環構造の解明と、砂丘の地下水涵養量の評価

河套灌区に砂丘、塩害地、湖が連続して分布する砂丘を2カ所(砂丘A、砂丘Bと呼ぶ)選定し、それぞれ、砂丘斜面中腹部、砂丘斜面下端、周辺地に地下水観測パイプを設置した。水圧センサー・ロガーを各地下水観測パイプ内に設置し、地下水位、地下水温、電気伝導度(EC)を連続観測した。砂丘Aについては20cmから100cmまで20cm深ごとの土壤水分量、地温、土壤塩分濃度を連続して記録した。観測地点から採土し、土の基礎的物理性と化学性を分析し、地下水、湖水、用水路水、排水路水の電気伝導度、pH、陽イオン組成を分析した。調査砂丘から西へ約10km離れた沙壕渠試験場へ気象観測装置の設置し、気象データを収集した。

現地採取した土を用いて土壌カラムを作成し、降雨浸潤試験、蒸発試験、温度勾配下での土壌水分移動実験を行い、基盤土である沖積土と比較して砂丘砂の水分移動特性の特徴を解明した。

観測された地下水位変動記録を分析した結果、年間を通じた長期的変動、降雨イベントに伴う変動、蒸発散に伴う日変動、から合成されていることが分かった。地下水位の標高差から地下水の移動方向を把握した。地下水位の存在する土層の比産出率を室内実験で決定し、各測定点の水位変動に比産出率をかけて各地点における地下水涵養量と蒸発散量を計算した。それらを互いに比較することで砂丘をめぐる水循環の態様と各地点の水資源保全における役割を検討した。

4. 研究成果

(1) 地形・地理空間情報による塩分集積地立地要因の分析と砂丘と湖の立地形態の分析

地形的特徴量にLogitモデルを適用してそれぞれの土地利用属性毎の立地傾向を把握した。水面、塩害地、塩害草地は、窪地部分に立地し、宅地と宅地土は、凸部に立地することが示された。砂地は排水路からの距離が遠く排水条件の悪い地点に立地する。適合度はMcFadden R²=約0.05と低いものの、土地利用毎の選択確率を調べた結果、塩害草地、宅地、水面、塩害地においては妥当な結果であると考えられた。

2014年の土地利用に対する1990年、2000

年の塩害草地選択確率を土地利用毎に分析し、塩害草地選択確率を年毎に閾値を設定し、分類クラス毎に整理した上で、塩害地リスク地点の推定を行った。1990年と2000年の傾向は互いに一致したので、2000年の塩害草地選択確率を用いて2014年の土地利用毎に割合を算出し、2014年以降において20%以上の確率で塩害化する地点をマッピングした。2014年以降の塩害地点面積を算出した結果、塩害地の改善が進んでおり、2014年以降では約7000ha塩害地面積が減少することが示唆された。

(2) 砂丘と湖の特徴的立地の評価と形状分析

砂地周辺の環境の特殊性を検討した。水面(湖)は砂地周300~600m地点に砂地を中心に北西方向に多く立地し、砂地は砂地周囲600~1500m以内で南東方向に多く立地することが分かった。両者の位置関係には正の空間的自己相関があり、集塊して立地することが統計的に示され、砂地と湖がしばしば隣接して立地することが証明された。土地利用をポリゴンの集合体として形状分析を行った。砂地周辺では農地地域と比べて、土地利用が多様であり、ポリゴン面積が小さく、ポリゴン数が多く、断片的に多様な土地利用が分布する地域であることが統計的に示された。また湖が隣接する砂地と湖が隣接しない砂地の形状には差異は無いことが示された。

(3) 塩害地面積率、砂地面積率と広域水収支の関係の分析と広域水収支に基づく砂丘地の地下水涵養量の推定

用排水路ブロック内の塩害地増加率とブロックへ出入りする水の差し引き量である水収支の関係を分析した結果、水収支の大きい(=水の取り込み量が多い)ブロックほど塩害裸地増減率は高く、塩害地が増加しやすい傾向が認められた。MODISの画素単位で重回帰分析を行った結果、“砂地面積率”と“塩害裸地面積率”の水収支に対する偏回帰係数が高いことから、水収支の大きいところで砂地面積率や塩害裸地面積率が高い傾向が認められた。

河套灌区全域にわたる広域水収支マップを作成し、砂地(砂丘)における地下水涵養量を計算したところ、砂地面積単位での平均涵養量は120mm/年となった。これを用いて、全砂地面積における地下水涵養水量を簡易的であるが推定することができた。作成した水収支マップは用排水量が支配的に影響するので、より正確な水収支マップの作成にはより詳細な用排水量記録や算出方法の改善が必要と考えられた。

農地の土地利用変化と水収支、塩害草地の土地利用変化と水収支の関係について多項ロジットモデルを用いた解析を行った結果、農地の中でも作況が良好ではなく、土壤水分が年間を通じて少なく変動が小さく、排水量も少ない地点が塩類化する可能性があることが示された。また、塩害草地の中でNDVI

の値が低く、土壤水分も少なく排水量が少ない地点が塩害裸地になったことが示された。

用水量過剰度と蒸発散量過剰度を計算し、これらの指標に基づいて塩類集積リスクを分級する表の作成を試みたが、明確な結果は得られなかった。次に、用排水ブロックごとに NDVI と用水量と蒸発散量の関係を調べたところ、用排水路ブロック内の平均 NDVI または農地の平均 NDVI が低く、蒸発散量が低いブロックで塩害地に変化する確率が高いことが示された。

(4) 砂丘とその周辺地域をめぐる水循環構造の解明と、砂丘の地下水涵養量の評価

砂丘砂は70~800 μ mの粒径画分が95%以上を占める特徴的な粒径組成を持っており、基盤土である周辺塩害地(シルト質壤土)と比較し、保水性、透水性が大きく異なる。

降雨浸潤試験の結果を Green and Ampt モデルを適用してソープティビティを指標として評価すると、周辺塩害地土の0.321に対し0.541となり、降水を浸潤させる能力が高いことが実証された。30mm 降水後の蒸発試験では、13 日後、砂丘砂は16.7mm、周辺塩害地土は40.6mm 蒸発し、砂丘砂からの蒸発量が少ないことが示された。砂丘砂では早い時間に浅い位置にゼロフラックス面が形成され、蒸発が抑制されることが分かった。

温度勾配下での土壤水分移動実験の結果は、砂丘砂では高温部から低温部への水移動が観測されたのに対し、周辺塩害地土では、水移動が認められなかった。砂丘砂では蒸発の発生する日中に地表面から下層に向かって大きな温度勾配が生じることを考慮すると、高温から低温へ向かう水分フラックスの発生は、蒸発を抑制する効果をもたらすことが示された。

地下水位の標高は、砂丘 B では砂丘中腹がもっとも高く、砂丘下端、周辺塩害地、湖へと低くなっており、砂丘から塩害地を経て湖へ向かう地下水の流れが想定された。砂丘 A では、砂丘下端がもっとも高く、次いで周辺塩害地、砂丘中腹の順で湖が最も低い。最終的には湖に向かうと思われるが、隣接した農地への灌漑などの局所的な影響を受けて複雑な移動方向を呈することが示唆された。

地下水位変動記録は、灌漑による年間を通じた季節的変動、降雨イベントに伴う変動、

蒸発散に伴う日変動、から合成されていることが分かった。30mmの降水イベントでも砂丘中腹部では地下水位の変動が観測されなかった。砂丘に降った雨は地下水を直接涵養することはなく、砂層中に一時保持された後、蒸発して失われる。この事実は土壤水分測定から推定したゼロフラックス面の位置の分析結果からもこの事実を支持された。

年間を通じた変動からは、4 月末の播種のための灌漑と10月から11月にかけての秋灌漑に同期した大きな地下水位変動が観測された。地下水位の存在する土層の比産出率を室内実験で決定し、各測定点の水位変動に比

産出率をかけて各地点における年間の地下水涵養量と蒸発散量を計算した。砂丘 A の涵養水量は、砂丘中腹で1061.9mm、砂丘下端は1532.2mm、周辺塩害地で1650.3mmであった。一方、砂丘 A の蒸発散量は、砂丘中腹で415mm、砂丘下端は1686.6mm、周辺塩害地で1704.1mmであった。砂丘 B の涵養水量は、砂丘中腹で1494.4mm、砂丘下端は1197.6mm、周辺塩害地で1397.9mm で、蒸発散量は、砂丘中腹で1464.5mm、砂丘下端は1554.3mm、周辺塩害地で1619.5mmであった。その結果、砂丘 A において、地下水として隣接地を涵養する水量は、砂丘中腹で754.9mm、砂丘下端で-148.8mm(マイナスは消費水量をあらわす)、周辺塩害地で-49.2mmと、砂丘中腹部から地下水として隣接地に供給される水量が最大であることが示された。同様に砂丘 B においては砂丘中腹で40.9mm、砂丘下端で-340.6mm、周辺塩害地で-127.2mm となった。すなわち、いずれの砂丘においても砂丘中腹部が灌漑水を給源とする地下水を貯留し、隣接地へ供給する役割を果たしていることが確認できた。また、その主要なメカニズムは、砂丘地へ流入した地下水は、砂層に覆われ地下水が地表面から深い位置に存在することと、砂丘砂が毛管間隙の少ない水理学的特性をもつために、地下水の毛管上昇が阻害されて蒸発が抑制される、地下水保全効果によることが示された。

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 4 件)

1) 守田秀則, 赤江剛夫: 塩類集積が卓越する土地の地理空間的特徴 - 内モンゴル河套灌区における現地観察データを用いた実証的研究 - 畑地農業, 査読有, 701, pp.15-23, (2017.4)

2) 守田秀則, 赤江剛夫: 複数の衛星画像を用いた乾燥地畑作地帯における土地被覆分類の試み - 中国内モンゴル河套灌区を事例として - 畑地農業, 査読有, 700, pp.11-19, (2017.3)

3) 守田秀則, 赤江剛夫: 中国内モンゴル自治区河套灌区における地上観察に基づく塩類集積の分析, 日本モンゴル学会紀要, 査読無, 第47号(2017), 印刷中

4) 守田秀則, 赤江剛夫: 衛星画像を用いた乾燥地灌漑農業地域の土地被覆分類精度の向上, 日本モンゴル学会紀要, 査読無, 第45号, pp.144-145(2015)

[学会発表](計 11 件)

1) 前川健太郎, 赤江剛夫, 森也寸志, 守田秀則, 史海濱: 乾燥地灌漑農業地域における砂丘地に隣接した塩害地の植生変化, 土壤物理学会大会講演要旨集, pp.76-77(2016.10.29)

2) 上田昌輝, 守田秀則, 赤江剛夫: 中国内モンゴル自治区河套灌区における土地利用形成要因分析 土地利用の類似性の影響を考慮し

た Nested Logit モデルによる分析 , 第 71 回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨集, 156-158(2016.10.27)

3)後藤愛華, 守田秀則, 赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における農地・塩害地の水
収支計算と土地利用変化の分析, 第 71 回農
業農村工学会中国四国支部講演会講演要旨
集, 24-26(2016.10.27)

4)上田昌輝, 守田秀則, 赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における土地利用変化の
地理空間的特徴の分析, H28 農業農村工学会
大会講演会講演要旨集, [講演番号 2-32]
(2016.8.30-9.2)

5)後藤愛華, 守田秀則, 赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における農地・塩害地の土
地利用変化と水収支の関係, H28 農業農村工
学会大会講演会講演要旨集, [講演番号
9-30](2016.8.30-9.2)

6)Kentaro Maekawa, Takeo Akae, Yasushi
Mori, Hidenori Morita, Haibin Shi :
Evaluation of Groundwater Recharge in a
Sand Dune for the Arid Land Irrigation
Agriculture, Japan Geoscience Union
MEETING2016(2016.05.22)

7)上田昌輝・守田秀則・赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における標高差に着目し
た土地利用分析, 農業農村工学会講演要旨集,
pp.254-255(2015.9.1-9.4)

8)後藤愛華・守田秀則・赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における土地利用と水収
支の関係, 農業農村工学会講演要旨集,
pp.256-257(2015.9.1-9.4)

9)前川健太郎, 赤江剛夫, 守田秀則, 史海濱,
森也寸志: 乾燥地灌漑農業地域における砂丘
地の水分動態, 農業農村工学会講演要旨集,
pp.476-477(2015.9.1-9.4)

10)上田昌輝 守田秀則 赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における標高差着目した土
地利用変遷の分析, 第 70 回農業農村工学会
中国四国支部講演要旨集,
pp.25-27(2015.10.7)

11)後藤愛華 守田秀則 赤江剛夫: 中国内
蒙古自治区河套灌区における塩害地率および
砂地率と水収支との関係, 第 70 回農業農村
工学会中国四国支部講演要旨集, pp.28-30
(2015.10.7)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1)研究代表者
赤江 剛夫(AKAE Takeo)
岡山大学大学院環境生命科学研究科・特命教
授
研究者番号: 10123423
(2)研究分担者
守田 秀則(MORITA Hidenori)
岡山大学大学院環境生命科学研究科・准教授
研究者番号: 60239663

(3)連携研究者
なし()

研究者番号:

(4)研究協力者
史 海濱(SHI Haibin)
内蒙古農業大学・建築および水利工程学院・教
授
シュエ ズウ (XUE ZHU)
天津農学院・准教授)