

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月16日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22380129

研究課題名（和文）

乾燥地灌漑農地における塩類化リスク地域の同定と持続的最適用水配分

研究課題名（英文）

Identification of saline risk area and sustainable optimum water allocation for irrigated farmland in arid region

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・教授

研究者番号：10123423

研究成果の概要（和文）：

- (1) 最高最低地表面温度だけから蒸発量を推定するモデル（MST モデル）を開発した。衛星画像と MST モデルから中国内モンゴル河套灌区を対象に蒸発量分布を推定し、得られた値の正当性を確かめた。
- (2) 河套灌区を対象に塩類化地域の分布と地形地理特性の関係を分析した。
- (3) MODIS 衛星画像の NDVI 値、その年平均と分散の経日変化と MST モデルによる蒸発量の関係から塩類化リスク地域を同定した。
- (4) 推定蒸発量に基づく水収支、地区別塩分収支を制約条件とし、洗脱効果係数で地区別排水特性を評価した線形計画を行い、持続的最適用水配分を決定する方法を提示した。用排水システム改良策として、搬送効率の向上が効果的であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

- (1) A model which can estimate evaporation only by maximum and minimum ground surface temperature (MST model) was developed. Spatial distribution of evaporation of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China was estimated by satellite image and MST model and the results were validated.
- (2) Relationship between spatial distribution of saline area in the District and topological, geographical conditions was analyzed.
- (3) Based on the relationship between seasonal change of annual average and deviation of NDVI (Normalized Vegetation Index) obtained by MODIS image and the estimated evaporation, saline risk area was identified.
- (4) As constraints of linear programming, water balance based on estimated evaporation and salt balance of each sub region was considered, and drainage water quality of each sub region was specified by a leaching efficiency coefficient. Applying linear programming, optimal sustainable water allocation was determined. The results showed that improvement of conveyance efficiency is effective as measures for improvement of the irrigation and drainage system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業土木学・農村計画学

キーワード：乾燥地、灌漑、塩分集積、衛星画像、蒸発量、地表面温度、最適水配分

1. 研究開始当初の背景

世界の陸地面積全体のうち、乾燥地・半乾燥地はその約 1/3 を占めている。乾燥地は元来、植物の光合成に必要な日射量に恵まれた地域であり、水と養分の補給さえすれば、大きな潜在的食料生産力を持っている。実際に乾燥地の灌漑農業は天水農業に比べ、2 から 3 倍の収量をあげており、乾燥地灌漑農業の持続性の確保と拡大は、世界的な食料危機の回避にとって極めて重要な課題である。加えて、近年の温暖化による気候変動の進行は、食料問題への危機を高めている。特に、北半球の中緯度地方で干魃が増大すると予測され、都市的水利用など他のセクターとの水資源要求の競合から、乾燥地灌漑農業の持続性を確保することが、ますます困難な状況が出現している。

乾燥地灌漑農業の持続性を確保するためには、作物生育に必要な水資源の確保と併せて、地域の塩分収支を維持することが根本的な課題である。作物への塩害に関連して土層内での塩分収支を検討する圃場レベルでの研究は進んでいるものの、地域レベルの検討はその複雑性のために不十分であった。これまで、内蒙古、河套灌区を対象に、地域レベルの塩分収支の観点から塩類化リスクを評

価し、持続性の評価を行うことを検討してきた。灌漑水から排水路水に至る経路において陽イオン濃度組成変化を測定したところ、Ca はそのほとんどが土壤中に沈澱、吸着され、安定的に保持されて移動経路から外れた。これに対し、Na は、活発に移動して土壌表層に卓越して集積した (赤江ら 2004)。したがって、塩分集積の原因イオンとして Na が重要であり、Na 収支に基づくリーチング用水量の方が従来の全塩濃度に基づく除塩用水量よりも実態に良く適合することを示した (AKAE et al., 2008)。次いで、Na 収支を取ることによって持続性を保障した上で、水資源の効率的利用を目的として、線形計画を用いた最適用水量配分計画を検討した (赤江ら 2007)。ただし、この方法では、本来、用水量は排水の濃度と量に影響するにも関わらず、排水量と用水量が互いに独立して決定される弱点がある。これを克服するため、移動経路途上での蒸発率を水の安定同位体比測定から推定するとともに、土壌マトリックスを通過する水と粗間隙中を通過する水とを分離して扱い、前者のみでリーチングが行われるとする洗脱効果係数の概念を導入した最適化手法を着想した。

一方、乾燥地灌漑農業における塩害地分布

の同定については、正規化植生指標 (NDVI) による評価が広く行われている。河套灌区における現地調査を通じて、同じ気象条件下の裸地であっても砂丘地と塩害地では地表面温度に大きな違いがある。熱収支を考えると、その差は主として蒸発量の差に起因するものと考えられた。蒸発に伴う土壌水分の毛管上昇が、灌漑農業に伴う 2 次的塩類化に不可欠な過程であることから、地温差による分別が、蒸発量については塩類化リスクの定量的評価に繋がる可能性を着想した。近年、衛星画像の中には、高い頻度で地球全体をスキャンした地表面温度情報を提供するものがある。これを利用し、地表面温度から蒸発量を推定する方法を組み合わせると、新たな塩類化リスク地域の同定方法が創出できるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、乾燥地灌漑農業の持続性の確保に向けて、まず、塩類化リスク地域の同定法を提示し、ついで、持続性を確保できる最適用水配分方法を提案する。その結果から、具体的な用排水システムの改善策を提示することである。すなわち、

- (1) 衛星画像と GIS および地温情報を用いた塩類化リスクの新しい評価方法を開発する。
- (2) 水の移動経路と蒸発による消費を組み込んだ最適な持続的灌漑用水配分計画法を開発する。
- (3) 塩類化要因を分析し、用排水システムの管理・改善策を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、三つのサブプログラムを設定してそれぞれの研究目的を達成するとともに、最終的にそれらを統合することで得られる新しい成果を目指した。

(1) 衛星画像・GIS・地温情報を用いた塩類化リスクマップの作成【サブプログラム 1】

①地表面温度を用いた地域蒸発量の推定法

第一の方法は、衛星画像データと GIS を利用した地温情報に基づく地域蒸発量推定法の確立である。まず、地温と蒸発量の関係を土壌カラム実験を通じて詳細に把握し、地表面のエネルギー収支に基づいて、最高地温および最低地温だけから蒸発量を推定するモデルを定式化する。ついで、本モデルを現地圃場に適用した野外実験を通じて、モデルの有効性を実証する。さらに、河套灌区全域に適用し、蒸発量分布を求め、推定した蒸発量分布の合理性を地域水収支に基づいて確かめる。

②衛星画像、GIS データと統計的モデルによる塩類化地域の同定

まず地形勾配、標高、曲率、用排水路からの距離などの地形的・地理的特性を説明しつつ多項ロジットモデルによる回帰分析で塩類地を推定した。ついで、蒸発量と NDVI の年平均と年分散およびそれらの経日変化の特徴から土地被覆を判定できるかを検討した。さらに、MODIS 画像の 6 つのバンドと NDVI の分散を説明変数とした多項ロジットモデルで土地被覆を推定する方法を検討した。最後に NDVI と①で推定した蒸発量を 2 軸にとった平面上に現状の土地被覆種をプロットし、塩類地を判別できる閾値領域を特定する。閾値領域条件に基づいて、塩類化のリスクの高い地域をマッピングした。

(2) 水の移動経路と蒸発を組み込んだ最適用水配分計画の策定【サブプログラム 2】

第二の方法は、塩分集積を起こさない持続性と、地域ごとの作物生産計画を保障する公平性を満たした上で、最も効率的な用水配分計画を策定する方法を提案することである。灌区全域の用排水路水を採水し、用水路から

排水路に至る塩分濃度の変化から、ブロックごとの塩分流出の特徴を洗脱効果係数を指標として表現する。線形計画では洗脱効果係数に加え、制約条件としてブロックごとの塩分収支およびサブプログラム1で推定した蒸発量を水収支条件として与え、実態をより精度高く表現する最適排水配分決定モデルを提案する。

(3) 持続的で効率的な最適水配分計画の提案【サブプログラム3】

第三の目的は、広域における正確な塩害地発生分布と最適化排水配分の結果に基づいて、用排水システムを診断し、実用的な改善方法を確認することである。

4. 研究成果

得られた研究成果の概要は下記のとおりである。

(1) 塩類地の同定と塩類化リスク評価

① 地表面温度を用いた地域蒸発量の推定法

地表面温度の日最高値と日最低値だけを用いて蒸発量を推定する方法（MSTモデル）を定式化した。地温と蒸発量の関係を土壌カラム実験を通じて詳細に把握し、地表面温度がサイン関数にしたがって変化すると仮定し、地表面の熱収支の原理に基づき、蒸発量を推定するモデルを定式化した。ついで、本モデルを現地圃場に適用した野外実験を通じて、モデルの有効性を実証したところ、比較的高い含水比で塩類土、非塩類土のいずれも実験値と推定値がよく一致した。さらに、河套灌区全域に適用し、蒸発量分布を求め、推定した蒸発量分布の合理性を地域水収支に基づいて確かめた。

② 衛星画像、GISデータと統計的モデルによる塩類化地域の同定

地形勾配、標高、曲率、用排水路からの距離などの地形的・地理的特徴から塩類地を推定した。その結果、標高が低い地域、勾配が

小さい地域、曲率が負で、その値が小さい地域に塩類地が存在すること、排水路からの距離が大きいと作況が悪い、砂地は勾配、標高とも高いことなどが明らかになった。

蒸発量とNDVIの年平均と年分散およびそれらの経日変化の特徴から土地被覆を判定できるかを検討したところ、Aqua/MODIS画像のNDVIとMSTモデルで推定した蒸発量から6種の土地被覆の判別が精度良く行えることを確かめた。

MODISの6つのバンドとNDVIの分散を説明変数とした多項ロジットモデルで土地被覆を推定する方法を検討したところ、 $R^2=0.841$ で適合することを見出した。

また、MSTモデルで推定した蒸発量とNDVI平面上に測定した塩類化リスクの高い閾値領域を切り出し、高塩類化リスク地域をマッピングした。その結果、5排干溝より東部で塩類化リスク地域が増大すること、それが排水路に沿って分布することおよびそのリスクの程度が2005年から2011年に掛け、年とともに特に灌区東部地域で亢進していることが示された。

(2) 最適用水量配分と適正用水量

洗脱効果係数とブロックごとの塩分収支および推定蒸発量を水収支制約条件として、取水量を最小とする目的関数のもとで、最適排水量配分を決定した。その結果、6排干溝ほか2本の排水能力を改良し、排水量を現状の3.54億tから5.98億tへ増大すれば、現状の用水量35.23億tを25.15億tまで削減することが可能である。また、問題ブロックの搬送効率を改良することで取水量を23.08億t、排水量を5.62億tとすることができ、搬送効率改良の優位性を示すことができた。

現状の標準的NDVIを実現するために、必要な基準用水量と実際の用水量の差を指標化し、用水量の適性度を判定した。適正基準浸透量

として300mmが算定され、これを超える用水量は削減可能であると考えられた。灌区全体では31.7億tまで削減できることを意味している。

(3) 用排水路システム改良方策の提案

広域における塩類化リスクの分布地域と最適用水量配分結果に基づいて、用排水システムを診断し、実用的な改善方法を検討した。塩類化リスク地は標高が低く、勾配が小さい灌区の東部に卓越して分布し、排水路に沿って作況が悪いことが分かった。最適化のためには、塩分集積が起こっている排水ブロックの排水路の容量を拡大することが必要で、そのブロックと必要排水容量が特定された。また、当該ブロックの用水路搬送効率の向上で用水量をさらに削減し、排水容量拡大を緩和できることが明らかになった。

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 7 件)

①XUE Zhu, AKAE Takeo: Estimation of Evaporation from Drying Soil Column with Different Initial Soil Water Content by Maximum Soil Surface Temperature, Journal of IDRE, No. 283 pp. 1-8, (2013) 査読有

②Zhu Xue, Takeo Akae and Hidenori Morita: Estimation of evaporation from arid-irrigated region using MODIS satellite imagery, Paddy and Water Environment, pp. 185-192, DOI 10.1007/s10333-011-0303-1 (2012. 1) (2013) 査読有

③XUE Zhu and AKAE Takeo: Maximum surface temperature model to evaluate evaporation from a saline soil in arid area, Paddy and Water Environment, Volume 10, Number 2, Pages 153-159 (2012) 査読有

④Zhu Xue, Takeo Akae and Haibin Shi: Difference in undulation causes different moisture regime, thermal environment and evaporation in saline soil, Journal of Nature and Science, 2010;8(10), pp. 112-116 (2010) 査読無

⑤Zhu Xue, Takeo Akae, Haibin Shi and Mari Ishida: Effect of soil water on soil temperature and salt in saline soil with undulate surface in Hetao Irrigation District, Journal of American Science, 2010;6(10), pp. 343-350 (2010) 査読無

⑥赤江剛夫・中尾千晶・史海濱: 乾燥地灌漑農地における塩分の挙動と持続的用水配分計画—内蒙古河套灌区を対象に—, 土壌の物理性115, pp. 43-50 (2010) 査読有

[学会発表] (計 16 件)

①守田秀則・赤江剛夫・森啓輔: 衛星画像画素値の年平均と年分散を用いた土地被覆分類—中国内蒙古自治区河套灌区を事例として—, 2012年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集, pp. 73-75 (2012)

②藤本雅一・守田秀則・赤江剛夫: 多項ロジットモデルを用いたMODIS画像の画素内土地被覆占有率の推定—中国内蒙古自治区河套灌区を事例として—, 2012年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集, pp. 67-69 (2012)

③河村一樹・赤江剛夫: 広域蒸発量と洗脱効果係数を用いた乾燥地農地の最適排水配分—中国内蒙古自治区河套灌区を対象として—, 2012年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集, pp. 31-33 (2012)

④藤本雅一・守田秀則・赤江剛夫: 複数時点のLandsat/ETM+を用いた塩害地の分析—中国内蒙古自治区河套灌区を事例として—, 2012内蒙古農業大学・岡山大学学術交流セミナー, pp. 29-31 (2012)

⑤守田秀則・森啓輔・赤江剛夫：衛星画像画素値の年平均と年分散を用いた土地被覆分析－中国内蒙古自治区河套灌区を事例として－、2012内蒙古農業大学・岡山大学学術交流セミナー、pp. 25-28 (2012)

⑥赤江剛夫・Xue Zhu：地表面温度と衛星画像データを用いた広域蒸発量の推定、2012内蒙古農業大学・岡山大学学術交流セミナー、pp. 19-24 (2012)

⑦藤本雅一・守田秀則・赤江剛夫：衛星リモートセンシングを用いた蒸発量と塩類集積の空間分布の分析、平成23年度農業農村工学会大会講演要旨集、pp. 800-801 (2011)

⑧Xue Zhu, Takeo Akae and Hidenori Morita：Estimation of Evaporation from Arid Irrigated Area using MODIS Satellite Imagery, 平成23年度農業農村工学会大会講演要旨集、pp. 798-799 (2011)

⑨藤本雅一・守田秀則・赤江剛夫：複数時点のLandsat/ETM+を用いた塩害地の分析－中国内蒙古自治区河套灌区を事例として－、2011年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集、pp. 128-130 (2011)

⑩Xue Zhu, Takeo Akae and Hidenori Morita：Spatial and temporal estimation of evaporation estimated by MODIS image - A case of Hetao Irrigation District-, 2011年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集、pp. 6-7 (2011)

⑪Xue Zhu and Takeo Akae:Estimation of Diurnal evaporation from saline soil, 2010年度農業農村工学会中国四国支部講演要旨集、pp. 10-12 (2010)

⑫Xue Zhu and Takeo Akae:Estimation of evaporation from saline soil in arid area, 2010年度土壤物理学会講演要旨集、pp. 122-123 (2010)

⑬Xue Zhu and Takeo Akae:Estimation of soil

evaporation from soil column under different soil water content by maximum surface temperature, 平成22年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集、pp. 220-221 (2010)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
該当なし

○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〕
該当なし

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・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：60230174

(3) 連携研究者

なし