

## 多波長センサーによるアラル海流域における 灌漑実態の広域モニタリング

### Satellite Remote Sensing of Irrigation in the Aral Sea Basin using Multi-Spectral Sensors

峠嘉哉<sup>(1)</sup>・Mbugua Jacqueline MUTHONI<sup>(1)</sup>・田中賢治・Temur KHUJANAZAROV

Yoshiya TOUGE<sup>(1)</sup>, Mbugua Jacqueline MUTHONI<sup>(1)</sup>, Kenji TANAKA and Temur KHUJANAZAROV

(1) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

(1) Department of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering, Tohoku University

#### Synopsis

In the Aral Sea basin, due to severe drought and land salinization, land use annually changes due to lack of water resource and local adaptation against salinization. However, these changes have not been recorded in national statistics.

Therefore in this research, actual irrigated area was attempted to detect by satellite remote sensing. Diurnal difference of surface temperature was utilized, because surface heat capacity and cooling effect of evapotranspiration are different on irrigated area comparing to surrounding arid non-irrigated zone. The diurnal difference of surface temperature was from MODIS sensor which has 1km and 12 hours resolution. And additionally, land surface model was utilized to remove climatic and geological changes in temperature.

As a result, suggested  $\Delta ST_{diff}$  index could detect distribution of irrigated area in main irrigated region in Uzbekistan and  $\Delta ST_{diff}$  value was lower where irrigated area fraction is large. Moreover, monthly and annual change of  $\Delta ST_{diff}$  was smaller from June to August in dry year.

**キーワード:** 灌漑, MODIS, 陸面過程モデル, アラル海流域

**Keywords:** Irrigation, MODIS, Land surface model, Aral Sea Basin

#### 1. はじめに

中央アジアのアラル海流域では、「20世紀最大の環境問題」と言われる深刻な渇水災害が数百万人に影響している(Glantz 2005, Micklin 2007). 主因である過剰な灌漑事業を展開した国家レベルの問題に加え、農家レベルでも経験的な灌漑操作が灌漑効率を低下させるため水需要量が増加していることが報告されている(Toderich et al., 2008). 特にカラカルパクスタン自治共和国域に属するアムダリア川デルタ地帯では、2001年の渇水年に水田の90%以上、綿花農場の75%が灌漑不能となったことが報告されていること

に加え(Frenken 2012), 本領域はアラル海流域内で最も気候変動の影響が大きい地域と推定されていることから、渇水は地域の重要な課題となっている。加えて近年では、過剰な灌漑を原因とした農地の二次塩類集積が深刻化しており、塩類集積による耕作放棄地も増加している(Ibrakhimov et al., 2007, 北村ら 2000, 野村 1996). 世界で最も塩類集積の影響が深刻な地域とも言われている。

このように本領域では、地域・年ごとに動的に灌漑の有無や作付作物が変化しており、その渇水・塩類集積被害の実態を明らかにする必要がある。しかし、途上国である当該地域では利用可能なデータが

限られ、耕作不可地の分布や時間変化、輪作の採用状況や渇水被害の実態は現地機関においても不明である。

そこで本研究では、渇水や塩類集積の影響が深刻なウズベキスタンを対象として、衛星解析を用いた灌漑地分布の推定を目的とする。衛星解析による灌漑地の推定については幾つかの既往研究があるが、植生指数や土質指数等を用いたものが主流である(Bastiaanssen, 2000)。しかしMbugua et al. (2018)は、本研究が対象とするウズベキスタン国内のアムダリア川デルタ地域では、地下水位が比較的高いために非灌漑域でも自然植生が育っており、植生指数では自然植生と灌漑地を区別することが難しいことを示した。加えて、水と土質で熱容量に違いがあることを利用して、MODISで観測される地表面温度の日格差から乾燥年と湿潤年の違いが明瞭に区別できることを示した。しかし、本手法では降雨後の地表面温度の減少や地形が高い地域での温度低下を考慮できなかった。

そこで本研究では、気候・地質条件による土壌水分量や地表面温度の変化を陸面過程モデルで計算し、衛星解析による観測結果と比較することで、人為的な灌漑操作による地表面温度の変化を特定する手法



Fig.1 Aral Sea Basin (AQUASTAT)



Fig.2 Furrow irrigation in Uzbekistan  
(Taken by author, 15<sup>th</sup> Jul. 2013)

を試みた。

## 2. 対象領域

本研究の対象は、Fig.1のアラル海流域の下流国にあたるウズベキスタンである。主な作付作物は綿花と小麦であり(福嶋ら 1995)、かつてはアムダリア川デルタ地帯で稲作が行われていたが、水不足や塩類集積が深刻となってきた近年では制限されている。灌漑方式はFig.2に示す畝間灌漑が主流であり、国内の9割以上の農場で採用されている。

ウズベキスタンは東部の半乾燥域から西部の強乾燥域にかけて、大まかには西部に行く程に乾燥度が進行する気候をしている。本研究で開発する衛星解析指標は、様々な気候・地質条件にも適用可能なものを目指しているため、ウズベキスタンを対象に半乾燥から強乾燥の気候帯で検証できることは有用である。加えて、同国西部でアラル海の南部に位置するアムダリア川デルタ域などでは、前述のように渇水や塩類集積において深刻な被害が報告されている。峠ら(2015)は、アラル海流域全体の陸域水循環モデル解析で気候変動影響評価を行った結果、流域全体で利用可能な水資源量が大きく変化しない中で、アムダリア川デルタ域は最も水需要量の増加が大きいと推定されることを示した。現段階でも渇水の影響が大きい地域であるが、今後も更なる水需給の逼迫が懸念される地域と言える。本研究の目的は、このように過去から将来へ灌漑状況が変化する地域を対象にモニタリング手法を開発することであるため、本域を含む領域を対象にできる研究意義は大きい。

## 3. 研究手法

水分の熱容量は高いために、乾燥地の灌漑地では自然植生域と比べて温度上昇の変化が緩やかとなる。加えて、蒸発散は夜間より日中で強いため、蒸発散による地表面温度の冷却効果は日中で強いと考えられる。以上より、一般的に灌漑地では昼夜の地表面温度差が小さくなり、その傾向は水分量の差が大きい乾燥域では顕著と考えられる。そこで本研究では、地表面温度日格差を用いた灌漑地分布の推定方法を検討する。その際には、前述のように気候・地形といった自然起因による温度変化を除去する必要があるため、陸面過程モデルを用いて自然起因の温度変化を考慮することで、人為的な水分操作の影響を抽出することを試みた。

### 3.1 衛星解析

衛星解析にはMODIS (MODerate resolution Imaging

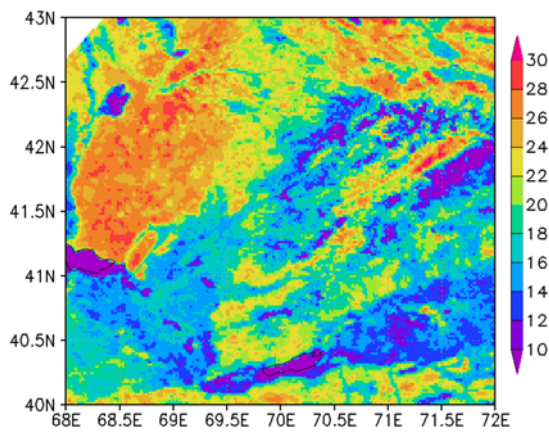


Fig.3 Diurnal difference of surface temperature  
(End of July 2012, MODIS)

Spectroradiometer)を用いた。MODISは全球の地表面温度を1km・12時間ごとに観測しているため、地表面温度の日格差を観測できる。

その他のセンサとしては、30m解像度・2週間間隔のLandsatや一時間ごと3km解像度の静止衛星であるEUMETSATがあるが、共に現地の灌漑地のスケールと比較すると時間・空間解像度のどちらかが制約となり灌漑操作を捉えられなかった。そのため、本論ではMODISを用いた結果のみを示す。

Fig.3は、2012年7月末のフェルガナ盆地における地表面温度日格差の分布図である。図の下部と中央部に広がる灌漑区において、地表面温度日格差が明瞭に下がっていることが分かる。しかしその一方で、図の右上部に位置する高標高域や、ダム湖等でも地表面温度日格差の低下が見られる。また、Fig.3左上部のように、同じ非灌漑域においても地表面温度日格差値は大きくばらついており、これは地表面上の植生状態の差等が影響していると考えられる。ダム湖等の水体は正規化水指数(NDWI)等の他の衛星指標を用いることで除外でき、標高の影響も標高による温度減率を考慮することで一定の補正効果を得られると考えられるが、今後広域に適用することを想定すると、細かな土地被覆の違いや降雨後の土壌水分の変化等を考慮する必要がある。

### 3.2 陸面過程モデル

今回使用した陸面過程モデルはSimple Biosphere including Urban Canopy (SiBUC)である(Tanaka 2004)。SiBUCはSiBをベースに開発され(Sellers et al., 1986)、灌漑地や水体や都市上での水熱収支を物理的に考慮できることを特徴としている。土地被覆条件には、非灌漑地として森林域や裸地等を含む10種類に灌漑地、都市域、水体を考慮できる。

入力条件には、気象データとしてJRA55を用い(Kobayashi et al., 2015)、降水量データはGSMaPv6の

衛星観測値を用いた(Ushio et al., 2009)。本解析では降水と灌漑を分離するため、限られた気象観測所のデータから内挿して作られた全球降水量データを用いると、広域に降水が供給されるため局所的な降水の有無による地表面温度の違いが考慮できないと考えられるため、衛星解析による降水量データセットとした。地表面条件にはMeteo Franceが公開しているECOCLIMAP ([http://www.cnrm.meteo.fr/gmme/PROJECTS/ECOCLIMAP/page\\_ecoclimap.hrm](http://www.cnrm.meteo.fr/gmme/PROJECTS/ECOCLIMAP/page_ecoclimap.hrm))から植生・地質条件を与え、土地被覆には、GLCC version2 (<http://edc2.usgs.gov/glcc/>)を用いた。空間解像度は、局所的な地形変化を考慮するためにMODISと同様の1km解像度で計算した。非灌漑条件では、GLCCの灌漑地植生を非灌漑耕地へと変更して解析した。

### 3.3 灌漑地抽出指標

本研究では、灌漑指標として下記を検討した。

$$\Delta ST_{diff} = \Delta ST_{SAT} - \Delta ST_{LSM\_NI}$$

ここに、 $\Delta ST_{SAT}$ はMODISによる地表面温度日格差、 $\Delta ST_{LSM\_NI}$ は陸面過程モデルによって計算された非灌漑条件での日格差である。メッシュ内の灌漑面積率が高くなる場合には、 $\Delta ST_{SAT}$ が小さくなるため指標は負の値になると想定される。

## 4. 結果

### 4.1 通常年の灌漑地分布推定結果

本節では、渇水の影響が無い通常年を対象に、 $\Delta ST_{diff}$ の空間分布を確認すると共に、Doll (2000)による2000年頃の全球10km解像度の灌漑面積率データセットとの比較を示す。Fig.4が $\Delta ST_{diff}$ の空間分布であり、Fig.5は統計値との比較結果である。灌漑面積率データセットは10km解像度であるため、メッシュ内の $\Delta ST_{diff}$ 平均値との比較を示しており、統計値の中で灌漑面積率がゼロのメッシュは除いている。各図の(a)から(c)には、非灌漑期の1月、綿花灌漑期の初期である6月、灌漑期の8月の季節変化を示す。対象とした2002年は通常年で渇水の影響が無かったとされている。

非灌漑期である1月は人為的な水操作がほとんど行われていないため、モデル解析値と衛星観測値との比較結果と言える。 $\Delta ST_{diff}$ の指標はウズベキスタン中央部から西部にかけての強乾燥地で高く、自然植生域で低い傾向となった。また、灌漑面積率統計値と比較して相関が見られなかった。一方で、灌漑期の6月や8月に入ると灌漑面積率の増加に伴って指標が減少することが示された。灌漑の有無だけでなく、灌漑面積率が高いほど指標が低くなる傾向がみ

られることから、灌漑の面積率を定量的に示せる可能性がある事が分かった。灌漑面積率が80%を超える場合に値が上昇しているが、80%を超えるメッシュが少ないために特定地域の結果のみに偏って示されたためと考えられる。Fig.4の空間分布では、特に8月における灌漑区域が明瞭に示された。西部のアムダリア川デルタやザラフシャン川流域、フェルガナ地域やスルハンダリア川流域などの、同国における灌漑地帯が明瞭に抽出されている。

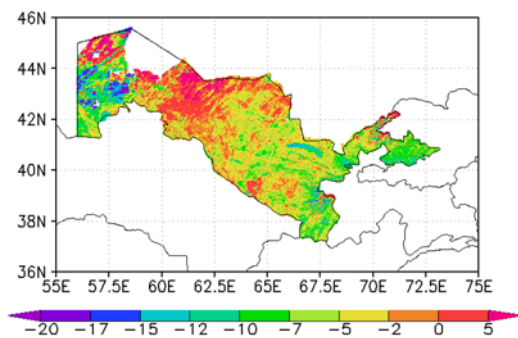
その一方で、同じ灌漑面積率内でのばらつきも大きい結果となった。その理由は、1式のように $\Delta ST_{diff}$ は差で計算されるため、地表面温度の日変化が大きい地域で感度が高くなるためと考えられる。また、比較に用いた灌漑面積率データセットや、陸面過程モデルと衛星解析精度の影響もあると考えられる。今後は、灌漑面積率が高いと考えられる一方で、温

度変化が想定外となっている地域については、過去の調査時に撮影したGPS写真の情報や、今後の調査により原因を詳細に探る必要がある。

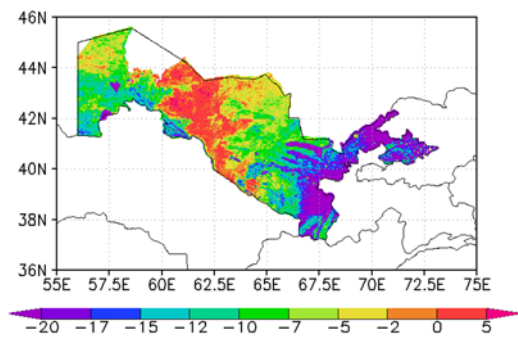
#### 4.2 $\Delta ST_{diff}$ の月・年変化

次に、 $\Delta ST_{diff}$ 値を月ごと・灌漑面積率ごとに平均したものがFig.6とFig.7であり、Fig.6に月ごとの変化を示し、Fig.7には年変化を示す。ここに、2001年や2008は渇水の影響が大きく、他の年は通常年である。

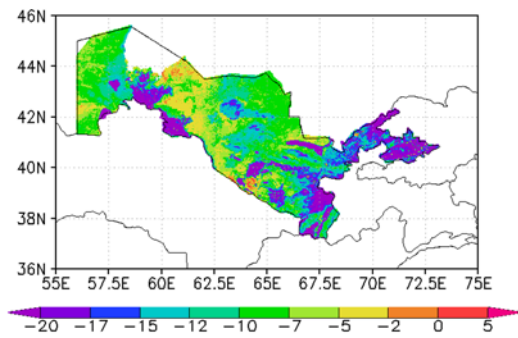
Fig.6の月変化を見ると、 $\Delta ST_{diff}$ の灌漑期における大幅な低下と非灌漑期における増加が見られる。通常年と渇水年では、共通して6月まで継続的に減少しているものの、渇水年では8月に低下が見られず6月と同じ傾向となっている。そのため、 $\Delta ST_{diff}$ の季節変化を見ることで、水需要量が増加する夏季において渇水による灌漑不可が見られた可能性がある。



(a) Jan. 2002

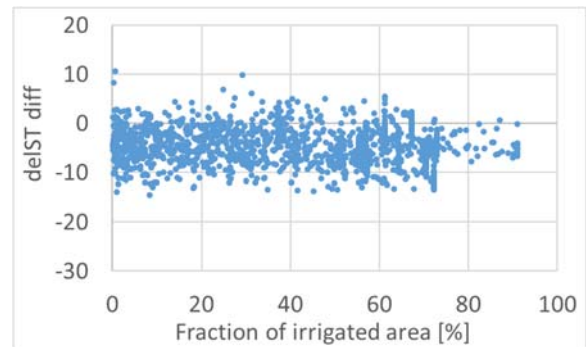


(b) Jun. 2002

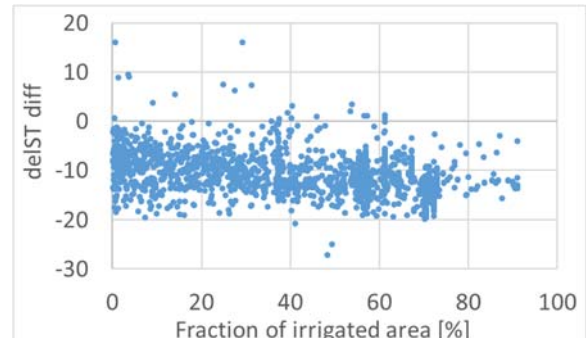


(c) Aug. 2002

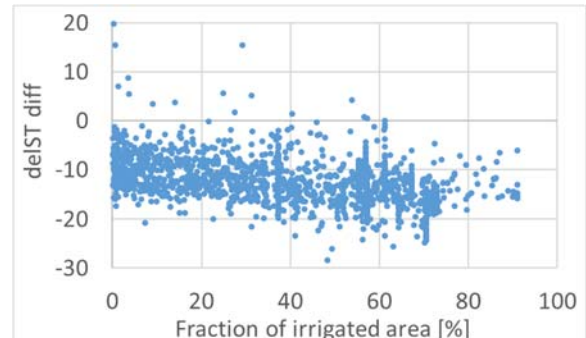
Fig.4  $\Delta ST_{diff}$  distribution in Uzbekistan



(a) Jan. 2002



(b) Jun. 2002



(c) Aug. 2002

Fig.5 Comparison between irrigation fraction dataset and  $\Delta ST_{diff}$

その一方で、Fig.7のように年毎の変化を2月、6月、8月を対象に図示すると、各年の間で大きな差が見られなかった。その理由は、渇水年において灌漑地では、地表面温度日格差観測値が例年と比べて増加するが、陸面過程モデルでの解析においても渇水年で気温が高くなるために $\Delta ST_{LSM\_NI}$ が同様に高くなり、結果としてトレンドがうまく出ないことが考えられる。

以上より、 $\Delta ST_{diff}$ は月ごとの変化を見ると違いが見られるが、年ごとに比較すると違いが小さい傾向が見られた。特にFig.7のような年ごとの比較については、差で計算した1式ではなく比を用いることで、抽出の精度を上げられることが期待できる。

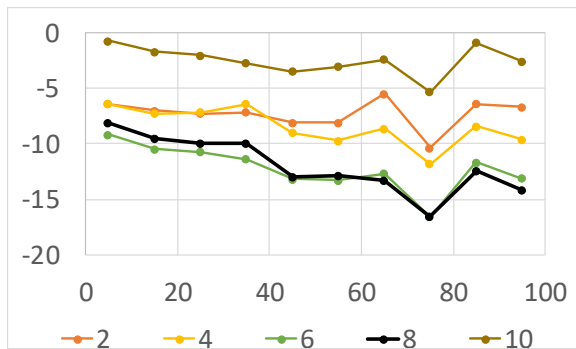
以上より本節では、衛星解析と陸面過程解析を併用することで灌漑域を抽出する手法を開発して検証を行った。ウズベキスタン国内における灌漑地分布

や、季節変動は抽出できる可能性が示されたものの、渇水の影響を含む年変化については違いが明瞭に出なかった。今後は渇水年と通常年の違いを抽出できる解析手法として改良する必要がある。

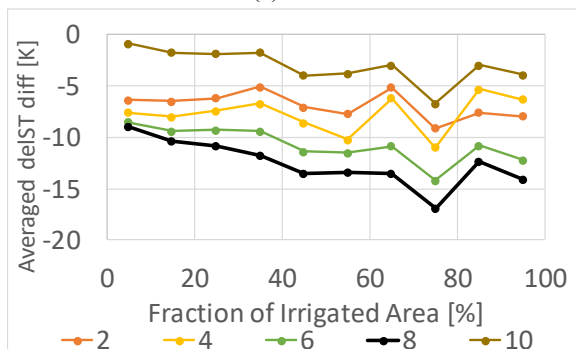
## 5. 結語

本研究では、渇水や塩類集積の影響が大きいウズベキスタンを対象として、灌漑地の分布を推定することを試みた。その際には、地表面温度の日格差について、MODISによる衛星解析結果と陸面過程モデルによる非灌漑条件での結果を比較することで、人為的な水利用による地表面温度の変化のみを抽出する手法を開発した。

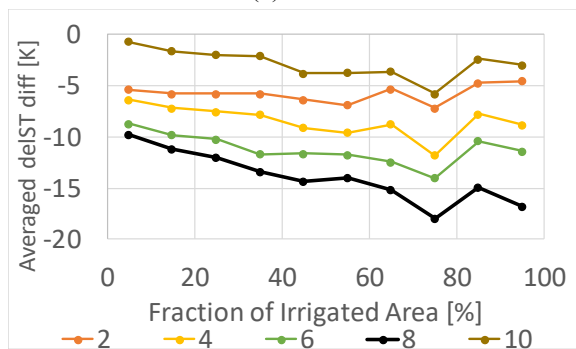
その結果、検討した $\Delta ST_{diff}$ 値について、ウズベキスタンの主要な灌漑地区が抽出できていることが確



(a) 2001

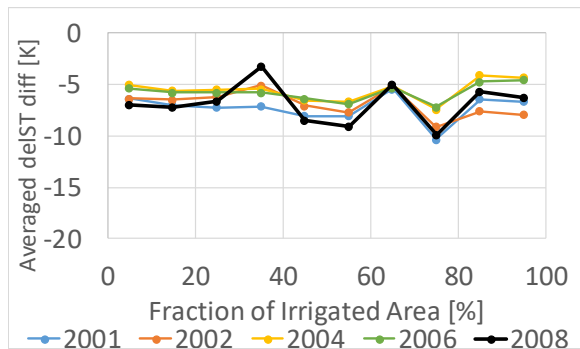


(b) 2002

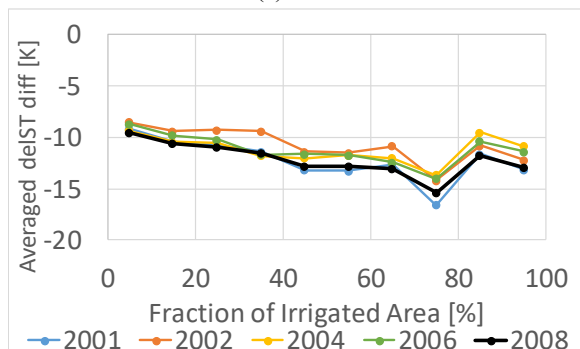


(c) 2006

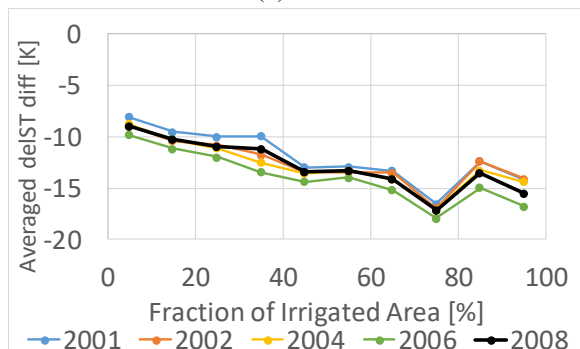
Fig.6 Monthly average of  $\Delta ST_{diff}$  in each irrigation fraction



(a) Feb.



(b) Jun.



(c) Aug.

Fig.7 Annual average of  $\Delta ST_{diff}$  in each irrigation fraction

認できた。加えて、平年を対象とした場合に、灌漑面積率のデータセット値と比較すると、灌漑面積率が高くなる場合に $\Delta ST_{diff}$ 値も低下することが示された。また、その月・年変化を確認すると、渇水年では $\Delta ST_{diff}$ が6月以降に変化しないことが示された一方で、各年間で比較する場合には違いが見られなかった。よって、 $\Delta ST_{diff}$ の絶対量ではなく、季節変化から渇水の有無を判定する必要があることが示された。

今回は $\Delta ST_{diff}$ 指標についてのみ確認を行ったが、統計値との比較等は未だ不十分である。生じたばらつき等についても十分な考察ができていない。そのため、今後は筆者らによる過去の調査時に撮影したGPS情報付き写真等の情報を用いて、検証をしていく必要がある。また、 $\Delta ST_{diff}$ のようにモデル値と衛星解析値の差だけでなく、比などを用いた指標を試みる必要がある。

## 謝 辞

本研究は京都大学防災研究所共同研究（平成29年度一般共同研究29G-11）の成果による。ここに謝意を示す。

## 参考文献

北村義信, 矢野友久 (2000) : 中央アジア乾燥地における二次的塩類集積防止のための広域水管理研究, 地球環境, 5(1), 27-36.

峠嘉哉, 田中賢治, 中北英一 (2015) : アラル海流域における陸域水循環モデルを用いた気候変動の水需給バランスへの影響評価, 土木学会論文集 G(環境), 71(5), I\_183-I\_188.

野村政修 (1996) : ウズベキスタンにおける灌漑開発と綿作の展開—アムダリヤ下流域を中心に—, 経済論叢別冊, 調査と研究(京都大学), 10, 86-101.

福嶋義宏 (1995) : 地球水環境と国際紛争の光と影, 信山社.

Bastiaanssen, W. G., Molden, D. J., Makin, I. W. (2000): Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management*, 46(2), pp.137-155.

Doll, P., Siebert, S. (1999): A Digital Global Map of Irrigated Areas, Report A9901 (University of Kassel, Kassel, Germany).

Frenken, K.: Irrigation in Central Asia in figures, edited by: AQUASTAT, Food and Agriculture

Organization of the United Nations, Rome, 2013.

Glantz, M. H. (2005): Water, climate, and development issues in the Amu Darya Basin, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 10, pp.23-50.

Ibrakhimov, M., Khamzina, A., Forkutsa, I., Paluasheva, G., Lamers, J.P.A., Tischbein, B., Vlek, P.L.G., Martius, C. (2007): Groundwater table and salinity: Spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin). *Irrig. Drain. Syst.* 21, pp.219–236.

Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K., Takahashi, K. (2015): The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 93(1), pp.5–48.

Mbugua, J. M., Touge, Y., Kazama, S., Khujanazarov, T., Tanaka, K. (2018): Remote Sensing of Irrigation Water in the Aral Sea Basin Using Modis Sensor, *Proc. 8th International Conference on Fluid Mechanics (ICFM8)*, 2018.

Micklin, P. (2007): The Aral Sea Disaster, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, pp.47-72.

Sellers, P. J., Mintz Y., Sud Y.C., Dalcher, A. (1986): A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, vol.43, pp.505-531.

Tanaka, K. (2004): Development of the new land surface scheme SiBUC commonly applicable to basin water management and numerical weather prediction model doctoral dissertation, Kyoto University.

Toderich, N. K., Tsukatani, T., Shoaib, I., Massino, I., Wilhelm, M., Yusupov, S., Kuliev, T., Ruziev, S., (2008a): Extent of salt affected land in Central Asia: Biosaline agriculture and utilization of the salt-affected resources. *KIER Discussion Paper*, pp.648.

Ushio, T., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., Kawasaki, Z., (2009): A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87A, pp.137-151.

(論文受理日 : 2019年6月17日)